(Approved by the Board of High School & Intermediate Examination, U. P. as a Text-book in Physics for its Intermediate Examinations)

माध्यमिक भौतिक विज्ञान

द्वितीय भाग

(INTERMEDIATE PHYSICS)

Pt. II

बी० एन० कार

एम० ए० ; बी० एस-सी० ; एल-एल० बी०

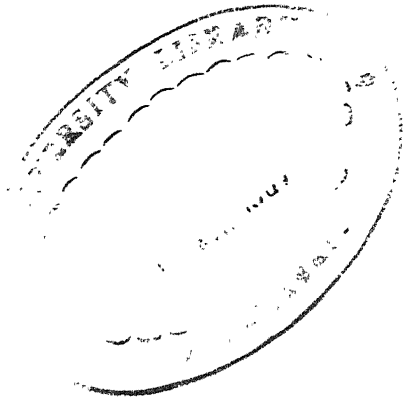
प्रिंसिपल एंग्लो बेंगाली इंटर कालेज, इलाहाबाद

एवं

प्रो० रतीराम शर्मा, एम० एस-सी०

घनानन्द गवर्नमेण्ट इंटर कालेज, मसूरी

ओ रि य न्ट लौं ग म न्स

बम्बई कलकत्ता मद्रास नई दिल्ली

प्रस्तावना

माध्यमिक श्रेणी (Intermediate) के विद्यार्थियों के लिए अंग्रेजी में बहुत-सी पुस्तकें उपलब्ध हैं, और इधर कुछ वर्षों से राष्ट्रभाषा हिन्दी के माध्यम के रूप में प्रादुर्भाव से हिन्दी में भी वैज्ञानिक मूल साहित्य की सृष्टि हुई है। पर, हिन्दी में वैज्ञानिक साहित्य के अभाव की पूर्त्ति के लिए निरंतर वृहत् प्रयास करना होगा।

पुस्तक में भौतिकी के जटिल सिद्धान्तों का स्पष्टीकरण रोचक भाषा में किया गया है। मूलभूत (Fundamental) तथ्यों की विवेचना में आधुनिक मान्यताओं की रूप-रेखा को विशेष महत्त्व दिया गया है। साथ ही अनावश्यक विवरणों से पुस्तक को मुक्त रखा गया है। विज्ञान के अध्ययन की इस प्रारंभिक अवस्था में विद्यार्थियों की जिज्ञासा जागृत हो और विषय की ओर अभिरुचि उत्पन्न हो; इसी दृष्टिकोण को प्राधान्य दिया गया है।

इस बात को ध्यान में रखा गया है कि पुस्तक का कलेवर अधिक न हो, जिससे मूल्य सस्ता होने के कारण विद्यार्थियों को सहज ही उपलब्ध हो सके। यथासंभव, भारत सरकार द्वारा स्वीकृत वैज्ञानिक पदावली को ही अपनाया गया है। प्रत्येक अध्याय के अन्त में सारांश दिया गया है, जिससे दुहराने में सरलता हो।

लेखकगण श्री हरिश्चन्द्र सक्सेना, एम० एस-सी० (भौतिकी एवं गणित), एल-एल० बी०, अध्यक्ष, भौतिकी विभाग, सिटी ए० वी० कॉलेज, इलाहाबाद के विशेष आभारी हैं। पुस्तक को उपयोगी बनाने में उनका अनुदान महत्त्वपूर्ण है।

आशा है विद्यार्थीगण एवं शिक्षक समुदाय पुस्तक की त्रुटियों को क्षमा करेंगे और वांछित सहयोग प्रदान करेंगे। लेखकगण पुस्तक को सुधारने के सम्बन्ध में सुझावों का स्वागत करेंगे।

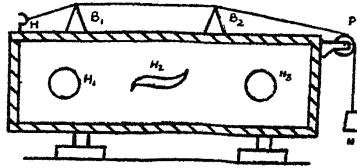
5 जून 1959

— लेखक

शुद्धि-पत्र

पृष्ठ	लाइन	अशुद्ध	शुद्ध
6	13	दैशित	देशित
4	4,5	वामावत्त	वामावर्त्त
71	16	कुंड,	कुंट
154	17	बाँयट	बायो
265	10	$\sqrt{}^{2}$ गुना मोटा होगा	$\sqrt{}$ 2 गुना मोटा होगा
266	6,14,15,16	K	k

चित्र

पृष्ठ 52 चित्र 20—सुरमापी

पृष्ठ 298 चित्र 75—धारित्र का शुद्ध चित्र

विषय सूची

प्रथम प्रकरण

ध्वनि

द्वितीय प्रकरण

चुम्बकत्व

तृतीय प्रकरण

स्थिर विद्युत् विज्ञान

चतुर्थ प्रकरण

धारा विद्युत

पंचम प्रकरण

आधुनिक भौतिक-विज्ञान

अध्याय 1

ध्वनि उत्पादन

(Production of Sound)

1.1. वास्तव में 'ध्वनि' शब्द दुहरे अर्थों में प्रयुक्त होता है ; एक तो उस 'अनुभूति' के लिये जो हमें अपनी श्रवणेन्द्रिय (कान) द्वारा होती है और दूसरे उस 'भौतिक कारण' के लिये भी जो उस अनुभूति को उत्पन्न करता है। भौतिक विज्ञान में हम उन सब भौतिक क्रियाओं का अध्ययन करते हैं जो ध्वनि के उत्पादन (production), संचार (propagation), और ग्रहण करने (reception) में होती है।

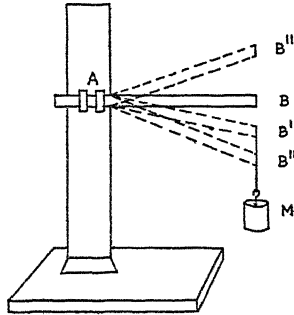
1.2. **कम्पन और ध्वनि-उत्पादन (Vibration and Sound-Production)**—ध्वनि-उत्पादकों की परीक्षा करने से यह ज्ञात हुआ है कि शब्द की उत्पत्ति के लिये उत्पादक के किसी न किसी अंग का कम्पन करना अनिवार्य है। शब्द चाहे मक्खी की भिनभिनाहट हो या शेर की उद्घोषित दहाड़ ; वीणा का मधुर स्वर हो अथवा गर्दभ महाशय की ढेंचों-ढेचों ; तबले की ताल हो चाहे धनुष की टंकार परन्तु ध्वनि-उत्पत्ति के समय उत्पादक का कम्पन करना आवश्यक है। जिस क्षण कम्पन समाप्त हो जायेंगे शब्द भी समाप्त हो जायेगा। जीवधारी अपने गले की एक झिल्ली (membrane) को कम्पित करके शब्द उत्पन्न करते हैं। सितार और सरंगी में तार, बाँसुरी और फ्लूट (flute) में एक पतली पत्ती, तथा तबले और ढोलक में खाल के कम्पन से ध्वनि उत्पन्न होती है। हारमोनियम से भी ध्वनि उसी समय निकलती है जब धोकनी की हवा से रीड (reed) की पत्तियों में कम्पन होता है।

मेज़ पर रखे हुए एक पीतल के गिलास में पेंसिल से चोट मारकर ध्वनि उत्पन्न कीजिये। अब अपनी उँगली से गिलास को धीरे से स्पर्श कीजिये, कम्पन का अनुभव होगा। दो तरफ़ से गिलास को ज़ोर से दबाइये। कम्पन बन्द हो जायेंगे, परन्तु साथ ही ध्वनि भी समाप्त हो जायेगी।

अतः ध्वनि उत्पादक से उसी समय तक ध्वनि उत्पन्न होती है, जब तक उसमें कम्पन होते रहते हैं। परन्तु क्या कम्पन करने वाली सभी वस्तुओं से ध्वनि निकलती है और हमें सुनाई पड़ती है ?

1.3. **कर्णगोचर आवृत्ति की सीमाएँ (Limits of Audible Frequencies)**—कम्पन करते समय प्रत्येक कण या वस्तु अपनी मध्यमान स्थिति के दोनों ओर बार-बार दोलन करता है। प्रति सेकेंड किये हुए दोलनों की संख्या वस्तु की आवृत्ति (frequency) कहलाती है।

बहुत से मनुष्यों पर किये गये प्रयोगों द्वारा यह ज्ञात हुआ है कि मनुष्य का कान (human ear) केवल उसी ध्वनि से प्रभावित हो सकता है जिसके उत्पादक की कम्पन आवृत्ति (Frequency of Vibration) कम से कम 30 प्रति सेकेंड और अधिक से अधिक 30,000 प्रति सेकेंड हो। वास्तव में यह सीमा भी विभिन्न व्यक्तियों के लिये भिन्न-भिन्न होती है और एक ही व्यक्ति के लिये उसकी आयु के साथ यह सीमा भी कुछ-कुछ बदल जाती है। ऊँची आवृत्ति की ध्वनि को सुनने के लिये कुछ जानवरों में विशेष क्षमता होती है। कुत्ता और चिमगादड़ इनमें उल्लेखनीय हैं। 30 प्रति सेकेंड से नीची और 30,000 प्रति सेकेंड से ऊँची आवृत्ति वाली ध्वनियाँ भी श्रवणीय ध्वनि (audible sound) से प्रकृति (nature) और उत्पादन तथा संचालन की क्रियाओं के दृष्टि कोण से बिल्कुल अनुरूप है। अन्तर केवल इतना है कि वे हमको शब्द के रूप में सुनाई नहीं देतीं और उसके लिये ध्वनियाँ दोषी नहीं हैं वरन् हमारे कानों की सीमित श्रवण शक्ति। 30 से नीची आवृत्ति की ध्वनि को infra sonic और 30,000 से ऊँची आवृत्ति की ध्वनि को ultra-sonic कहते हैं।

1.4. **कम्पन-कर्त्ता के आवश्यक गुण (Requisites of a Vibrator)**–चित्र नं० 1 की भाँति एक इस्पात (Steel) की पत्ती को क्षैतिज (horizontal) स्थिति में कस दीजिये। AB पत्ती के स्वतन्त्र सिरे B से एक भार M ग्राम लटका दीजिये। पत्ती झुक कर AB' स्थिति में आ जायेगी। BB' की नाप, कहिये, x से० मी० है। लटकाये हुए भार को अब $2M$ ग्राम कर दीजिये। स्वतन्त्र सिरा B'' स्थिति में आ जायेगा। नापने से ज्ञात होगा कि $BB''=2x$ से० मी० है। अर्थात् पत्ती पर लगाया हुआ बाहरी बल उसमें उत्पन्न हुए विचलन या झुकाव के समानुपाती होता है।

चित्र 1

बाहरी बल की क्रिया से पत्ती जब झुकती है तो उसकी प्रत्यास्थता (elasticity) के कारण उसमें एक आन्तरिक प्रतिक्रिया उत्पन्न होती है, जो पत्ती को उसकी पूर्व स्थिति में लाने का प्रयत्न करती है। इसीलिये इसको प्रत्यावस्थान बल (force of restitution) कहते हैं। सन्तुलन स्थिति में लगाया हुआ बाहरी बल प्रत्यावस्थान बल के बराबर परन्तु विपरीत होगा। BB' और BB'' स्वतन्त्र सिरे B के लिये उसकी पूर्व-स्थिति से विस्थापन (displacement) है। अतः यह सिद्ध हुआ कि **प्रत्यावस्थान बल वस्तु के विस्थापन के समानुपाती है।**

भार (2*M* ग्राम) का लटकाने वाले डोरे को दियासलाई से जला दीजिये। भार नीचे गिर जायेगा और पत्ती प्रत्यावस्थान बल के कारण अपनी पूर्व स्थिति *AB* की ओर चलेगी। वेग बढ़ता जायेगा। *AB* स्थिति में वेग अधिकतम होगा और ऊर्जा (energy) पूर्णतया गतिज (kinetic) होगी। न्यूटन के अविस्थितित्व (inertia) के नियम के अनुसार पत्ती अपनी पूर्व स्थिति *AB* पर पहुँचकर एकदम स्थिर नहीं हो जायेगी वरन् उसके दूसरी ओर भी चलती रहेगी। परन्तु जैसे ही वह अपनी पूर्व स्थिति (*AB*) को पार करके दूसरी ओर चलना आरम्भ करेगी प्रत्यास्थता के कारण फिर एक प्रत्यावस्थान बल उत्पन्न होगा जिसकी दिशा वेग के विपरीत और जिसका मान विस्थापन के साथ-साथ बढ़ता जायेगा। वेग कम होता जायेगा और गतिज ऊर्जा धीरे-धीरे स्थितिज शक्ति में बदलती जायेगी। अन्त में AB''' स्थिति में पत्ती एक क्षण के लिये स्थिर हो जायेगी जबकि $BB'''=BB''=2x$ होगा और ऊर्जा पूर्णतया स्थितिज (potential) होगी। क्षणिक विश्राम के बाद पत्ती अपनी वापिसी यात्रा पर अग्रसर होगी, वेग बढ़ता जायेगा और *AB* स्थिति में फिर समस्त ऊर्जा गतिज होगी। इससे वह फिर नीचे की ओर विस्थापित होगी। पूर्व स्थिति के दोनों ओर कम्पन की पुनरावृत्ति बार-बार होगी और पत्ती कम्पन करती रहेगी। आवृत्ति (frequency) की संख्या पत्ती की लम्बाई और प्रत्यास्थता पर निर्भर करेगी।

इस विवेचना से यह स्पष्ट है कि कम्पन करने के लिये आवश्यक है कि—

1. वस्तु में प्रत्यास्थता (elasticity) हो।
2. वस्तु गतिज ऊर्जा (kinetic energy) धारण कर सके।
3. वस्तु की गतिज ऊर्जा का स्थितिज ऊर्जा (potential energy) में और स्थितिज ऊर्जा का गतिज ऊर्जा में परिवर्तन सम्भव हो।

इसी प्रसंग में हमने देखा कि पत्ती बार-बार एक निश्चित समय के पश्चात् अपनी पूर्व स्थिति से गुज़रती है। इसलिये उसकी गति को आवर्त्त गति (periodic motion) और उस निश्चित समय को कम्पन का आवर्त्त काल (periodic time) कहते हैं। पुनश्च पत्ती के कम्पन में प्रत्यावस्थान बल उसके विस्थापन के समानुपाती है। इस प्रकार की गति को सरल आवर्त्त गति (Simple Harmonic Motion) कहते हैं। ध्वनि उत्पादक की सरल आवर्त्त गति (S. H. M.) से ही सरलतम ध्वनि उत्पन्न होती है। अतः इसकी बड़ी महत्ता है और इसका सविस्तार अध्ययन हम दूसरे अध्याय में करेंगे।

सारांश

ध्वनि की उत्पत्ति के लिये उत्पादक का कम्पन करना अनिवार्य है।

हम केवल उसी ध्वनि को शब्द के रूप में सुन सकते हैं जिसकी आवृत्ति 30 प्रति सेकेंड से अधिक और 30,000 प्रति सेकेंड से कम है। कुत्ता और चिमगादड़ ऐसे जानवरों

में से हैं जिनमें 30,000 से भी ऊँची आवृत्ति वाली ध्वनि (ultra-sonic) को भी सुनने की विशेष क्षमता है।

कम्पन करने के लिये आवश्यक है कि वस्तु में प्रत्यास्थता हो और उसकी गतिज व स्थितिज ऊर्जाएँ परस्पर लगातार परिवर्तित होती रहें।

जब कम्पन कर्ता में प्रत्यावस्थान बल विस्थापन के समानुपाती होता है तो गति सरल आवर्त्त गति होती है।

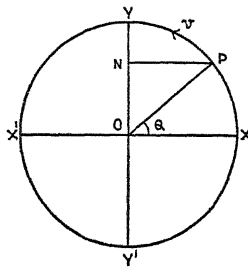
अभ्यास के लिये प्रश्न

1. ध्वनि किसे कहते हैं?
2. कम्पन और ध्वनि का क्या सम्बन्ध है?
3. कम्पन के लिये आवश्यक शर्तं क्या है?
4. सरल-आवर्त्त-गति (S. H. M.) क्या है? उदाहरणों द्वारा स्पष्ट कीजिए।

अध्याय 2

सरल आवर्त्त गति और तरंगें

(Simple Harmonic Motion and Waves)

2.1. कण की जिस गति की पुनरावृत्ति एक निश्चित समय के पश्चात् बार-बार होती है आवर्त्त गति (Periodic Motion) कहलाती है। घड़ी की सुइयों का घूमना, एक वृत्त में समरूप गति, अथवा दीर्घवृत्तीय (elliptic) मार्ग में पृथ्वी का सूर्य की परिक्रमा करना आदि सब आवर्त्त गतियाँ हैं। परन्तु सरलतम आवर्त्त गति तब उत्पन्न होती है जब कण एक सरल रेखा में एक विन्दु (मध्य स्थिति) के इधर-उधर आवर्त्त गति करता है। किसी वृत्त की परिधि पर समान गति से परिभ्रमण करने वाले कण से वृत्त के एक व्यास पर खींचे गये लम्ब के पद (foot) की गति स० आ० ग० का आदर्श उदाहरण है।

चित्र 2

2.2. वृत $XYX'Y'$ की परिधि पर वामावत्त (anticlock-wise) दिशा में समान गति v से एक कण P चल रहा है। XOX' और YOY' क्रमशः क्षैतिज और ऊर्ध्व व्यास हैं। कण की क्षणिक स्थिति P पर OP रेखा X-अक्ष से θ कोण बनाती है। Y-अक्ष पर P से डाले गये लम्ब का पद N है। वृत्त को जनक-वृत्त (generating circle)

और गतिमान कण को जनक-कण (generating particle) कहते हैं। जैसे P विन्दु X से Y की ओर चलेगा N विन्दु O से Y की ओर चलता जायेगा। फिर जब P, Y से Y′ तक पहुँचेगा N विन्दु YOY' व्यास पर Y से Y′ तक गतिमान होगा। और P जब Y′ से X पर आयेगा तो N लौटकर फिर O पर आ जायेगा। इस प्रकार जितनी देर में P वृत्त का पूरा चक्कर लगाता है N भी YOY' व्यास पर एक पूरा दोलन (vibration) कर लेता है। दोनों का आवर्त्त काल (period) समान है, कहिये T। अतः दोनों की आवृत्ति (frequency) भी समान हुई, कहिये $n=1/T$। मध्य-स्थिति से अधिकतम विस्थापन आयाम (amplitude) कहलाती है।

कण P एक सेकेंड में n बार 2π रेडियन का कोण पूरा करता है। अतः उसका कोणीय वेग (angular velocity) $\omega=2\pi n$ हुआ।

$$\text{परन्तु कोण}=\frac{\text{चाप}}{\text{त्रिज्या}}$$

$$\therefore \text{ एक सेकेंड में पार किया कोण}=\frac{\text{एक से० में पार की हुई परिधि}}{\text{अर्द्ध व्यास}}$$

अर्थात् $\omega \quad =v/r$

यह दिखाया जा सकता है कि $\overrightarrow{PO}$ की दिशा में P का

$$\text{त्वरण}=\frac{v^2}{r}=\omega^2 r \text{ होगा।}$$

कण की क्षणिक स्थिति P के संगत N के लिये

$$\text{विस्थापन } y = ON = \overrightarrow{OP} \sin OPN$$

$$y = r \sin \theta \quad [\because r=\text{अधिकतम विस्थापन}]$$

$$\therefore \text{ विस्थापन}=\text{आयाम}\times\sin\theta$$

और N की गति एवं त्वरण क्रमशः P की गति और त्वरण के YO के समानान्तर विश्लिष्ट घटक (resolved parts) के बराबर होंगे।

अर्थात् N की गति$=v\cos\theta$ $\quad\overrightarrow{OY}$ की दिशा में।

एवं त्वरण $f=(\omega^2 r)\times\sin\theta$ $\quad\overrightarrow{YO}$ की दिशा में।

$$=\omega^2\times r\sin\theta$$

$$f=\omega^2\times y. \quad (\because y=r\sin\theta)$$

परन्तु y की धनात्मक दिशा $\overrightarrow{OY}$ है और त्वरण $\overrightarrow{YO}$ दिशा में है,

$$\therefore \quad f = -\omega^2 y.$$

$$\text{or } f = -Ky \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

त्वरण = − स्थिरांक × विस्थापन

अर्थात् विन्दु N का त्वरण उसकी मध्यस्थिति से नापे गये विस्थापन के समानुपाती है और सदैव मध्य विन्दु की ही ओर देशित (directed) रहता है।

$$\text{आगे स्थिरांक } K = \omega^2$$
$$= (2\pi n)^2$$
$$\therefore \quad 2\pi n = \sqrt{K}$$

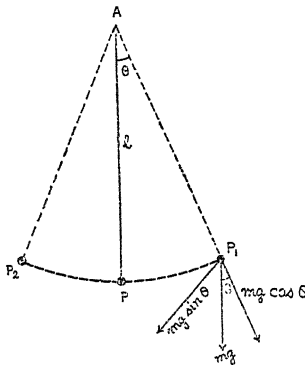
$$\text{तथा} \quad T = \frac{1}{n} = \frac{2\pi}{\sqrt{K}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

अथवा आवर्त्तकाल $= 2\pi / \sqrt{\text{स्थिरांक}}$

सारांशतः सरल आवर्त्त गति के लाक्षणिक गुण इस प्रकार हैं :—

1. गति एक सरल रेखा में एक विन्दु (मध्यस्थिति) के इधर-उधर हो।
2. एक निश्चित समय के अन्तर से गति की बार-बार पुनरावृत्ति हो।
3. कण का त्वरण उसकी मध्य स्थिति से नापे गये विस्थापन के समानुपाती हो।
4. यह त्वरण मध्य स्थिति के विन्दु की ओर दैशित हो। इसलिये त्वरण और विस्थापन की दिशायें परस्पर विपरीत होंगी।

त्वरण और विस्थापन का सम्बन्ध समीकरण (1) की भाँति होगा। एवं गति का आवर्त्त काल समीकरण (2) से ज्ञात होगा।

2.3. समीकरण (2) से स्पष्ट है कि N के दोलन का आवर्त्त काल निश्चित है तथा यह उसके आयाम से प्रभावित नहीं होता। ऐसी सभी गतियाँ समकालिक (isochronous) गति कहलाती हैं। इसका व्यवहारिक उदाहरण एक साधारण लोलक है बशर्ते वह अपनी मध्य स्थिति से 5 अंश से अधिक कोण नहीं बनाता।

चित्र 3

m ग्राम संहति का एक लट्टू P एक लचकदार (flexible) एवं भारहीन (weightless) डोरे की सहायता से एक सुदृढ़ (rigid) आलम्ब (support) से लटका हुआ है। लोलक के लटकन केन्द्र (centre of suspension) A तथा दोलन केन्द्र (centre of oscillation) P के बीच की दूरी l को लोलक की लम्बाई कहते हैं। हाथ से पकड़कर लोलक को उसकी मध्य स्थिति से हटाकर छोड़ दीजिये। वह दोलन करने लगेगा। लट्टू की एक क्षणिक स्थिति P_1 में उसपर कार्य करने वाले बलों पर विचार कीजिये—

लट्टू पर दो बल कार्य करते हैं

(i) भार mg धुर नीचे की ओर

(ii) डोरे में तनाव F

विस्थापन PP_1 के समानान्तर तथा इसकी लम्ब दिशा में mg बल के विश्लिष्ट भाग क्रम से $mg \sin \theta$ और $mg \cos \theta$ हैं। θ लोलक का विस्थापन कोण है। $mg \cos \theta$ भाग डोरे के तनाव F के बराबर और विपरीत होने से नष्ट हो जाता है। $mg \sin \theta$ भाग विस्थापन के समानान्तर एवं विपरीत है। इसको प्रत्यावस्थान बल (force of restitution) कहते हैं और यही लोलक की गति के ज़िम्मेवार है।

$$\text{प्रत्यावस्थान बल} = mg \sin \theta$$
$$= mg\,\theta \quad (\text{यदि } \theta \text{ छोटा हो तो } \sin \theta = \theta)$$
$$= mg\frac{PP_1}{l}$$

परन्तु न्यूटन के द्वितीय नियम से

$$mg\frac{PP_1}{l} = \text{लट्टू की संहति} \times \text{त्वरण}$$
$$= m \times \text{त्वरण}$$

$$\therefore \quad \text{त्वरण} = \frac{g}{l} \times PP_1$$

परन्तु जैसा कि स्पष्ट है त्वरण की दिशा विस्थापन PP_1 की दिशा के विपरीत है अतः

$$\text{त्वरण} = -\frac{g}{l} \times \text{विस्थापन।}$$

$$\text{अथवा त्वरण} = -\text{स्थिरांक} \times \text{विस्थापन}$$

क्योंकि एक ही स्थान (g=स्थिर) पर एक ही लोलक (l=स्थिर) के लिये g/l=स्थिरांक है।

परन्तु यह सरल आवर्त्त गति के लिये आवश्यक सम्बन्ध है। और अन्तिम धारा के समीकरण संख्या (1) व (2) की सहायता से लोलक का आवर्त्त काल,

$$T = 2\pi/\sqrt{\text{स्थिरांक}}$$
$$= 2\pi/\sqrt{g/l}$$
$$\text{or} \quad T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

स्पष्ट है कि लोलक का आवर्त्त काल उसके आयाम से प्रभावित नहीं होता और वह केवल लोलक की लम्बाई पर निर्भर करता है यदि लोलक एक ही स्थान पर दोलन करे।

किसी भी क्षण लोलक पर कार्य करने वाले प्रत्यावस्थान बल के व्यंजक ($mg/l \times$ विस्थापन) का निरीक्षण करने से ज्ञात होता है कि लट्टू अपनी मध्य स्थिति P से

ज्यों-ज्यों दूर हटता जाता है, गति के विपरीत दिशा में कार्य करने वाला बल बढ़ता जाता है जिससे लट्टू का वेग घटता जाता है यहाँ तक कि P_1 पर आकर वेग शून्य हो जाता है। अब वेग की दिशा पलट जाती है और उसका आंकिक मान (magnitude) बढ़ता जाता है। विन्दु P (मध्य स्थिति) पर वेग अधिकतम होता है परन्तु यहाँ विस्थापन, बल और त्वरण सब शून्य होते हैं। अपनी गत्यात्मक जड़त्व (inertia of motion) के कारण लट्टू P से बायीं ओर चलता ही जाता है। परन्तु अब फिर उस पर उल्टी दिशा में बल कार्य करने लगता है जिसका मान विस्थापन के साथ-साथ बढ़ता जाता है और अन्त में P_2 पर जाकर वेग फिर शून्य हो जाता है, परन्तु विस्थापन, बल और त्वरण तीनों अधिकतम होते हैं। वेग की दिशा फिर उलट जाती है और इस प्रकार लट्टू बार-बार मध्य स्थिति के इधर-उधर दोलन करता रहता है।

अतः स्पष्ट है कि एक पूरे दोलन में, दोनों चरम स्थितियों पर वेग का मान शून्य परन्तु विस्थापन त्वरण और बल अधिकतम होते हैं।

2.4. **कला (Phase)** :—कला वह व्यंजक है जिससे कण की गति की दशा (विस्थापन, वेग और त्वरण) का पूरा-पूरा ज्ञान हो सके। कला की नाप प्रायः समय से की जाती है। यह समय आवर्त्त काल के भागों में व्यक्त किया जाता है। और उस क्षण से नापा जाता है जबकि पिछली बार कण धनात्मक दिशा में चलता हुआ अपनी मध्य स्थिति पर था।

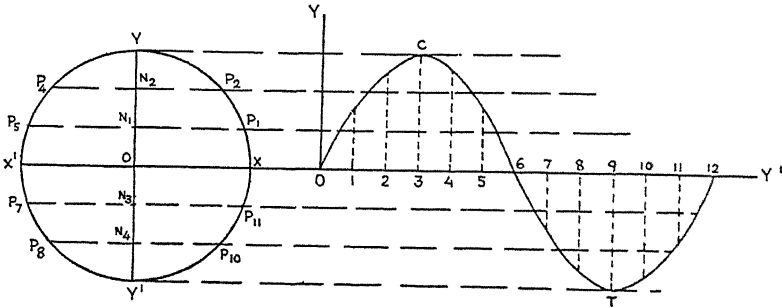
गत धारा के चित्र में लट्टू बायीं ओर से दाईं ओर चलता हुआ जब P_1 पर पहुँचता है तो उस क्षण की कला $T/4$ है क्योंकि इतने ही समय पूर्व धनात्मक दिशा में (दाईं ओर) चलता हुआ कण अपनी मध्य स्थिति P पर था। इसी प्रकार जब P_1 से लौटकर P पर पहुँचता है तो कण की कला $T/2$ होगी, इत्यादि।

कला की नाप उस कोण से भी व्यक्त की जाती है जो जनक विन्दु को जनक वृत के केन्द्र से मिलाने वाली रेखा X–अक्ष के साथ बनाती है जैसे कि धारा सं० 2 के चित्र–2 में θ कोण है। क्योंकि θ कोण के ज्ञान से विन्दु N का विस्थापन $y=r \sin \theta$ अथवा $y=r \sin \omega t$ से ज्ञात हो सकता है, जहाँ r कण (N) का आयाम है। फिर इससे गति के वेग और त्वरण दोनों की गणना सम्भव है। इन दोनों समीकरणों के लिये यह मान लिया गया है कि समय उस क्षण से नापा जायेगा जब P अक्ष–X को और विन्दु N अपनी मध्य स्थिति को धनात्मक दिशा में पार करता है।

परन्तु यदि कला कोण 'θ' और समय विन्दु P की उस क्षणीय स्थिति P_1 से नापें जब OP रेखा X–अक्ष से 'α' कोण बनाती है तो हमारे समीकरण,

$y=r \sin \theta$ तथा $y=r \sin (\omega t+\alpha)$ हो जायेंगे। यहाँ पर $\angle P_1OX=\alpha$ है। इस कोण को 'अवधि' (epoch) कहते हैं।

2.5. सरल आवर्त्त गति का लेखाचित्र (graph) :—समय को आवर्त्तकाल के अंशों में बदल कर X–अक्ष पर, और मध्यस्थिति से विस्थापन को Y–अक्ष पर लेकर खींचे गये ग्राफ द्वारा यह बड़ी सरलता से दिखाया जा सकता है कि स० आ० ग० करने वाले कण का विस्थापन समय के अनुसार किस प्रकार बदलता है। वैसे समीकरण $y=r \sin \omega t$ से प्रकट है यह वक्र 'ज्या-वक्र' (sine curve) जैसा होना चाहिये।

कल्पना कीजिये कि कण सरल रेखा YOY' पर दोलन करता है। O उसकी मध्य स्थिति और $OY=OY'=r$ उसका आयाम है। उसका आवर्त्त काल T sec है।

चित्र 4

YOY' को व्यास मान कर एक संकेत वृत्त (reference circle) धारा सं०2 की भाँति कल्पना कीजिये कि एक कण वृत्त की परिधि पर T आवर्त्त काल से चक्कर लगा रहा है, खींचिये। वृत्त का एक दूसरा व्यास $X'OX$ पहले ऊर्ध्व व्यास YOY' के लम्ब रूप खींचकर आगे बढ़ाइये। इस प्रकार X, Y, X', Y' से वृत्त की परिधि चार बराबर भागों में विभक्त हो गई। अब इन चारों भागों में से प्रत्येक को तीन बराबर भागों में बांटिये। मान लीजिये विभाजक विन्दु P_1, P_2, P_4, P_5, P_7, P_8, P_{10}, P_{11} हैं। इस प्रकार वृत्त की परिधि 12 बराबर भागों में बंट गई।

अब जनक विन्दु P, $T/12$ समयान्तर से P_1, P_2, Y, P_4. . .आदि स्थितियों में होता हुआ चक्कर लगायेगा।

क्षैतिज व्यास $X'OX$ के बढ़े हुए भाग में किसी विन्दु O पर एक लम्ब OY खींचिये। ग्राफ के लिये क्षैतिज रेखा OX (X–अक्ष) पर समय और ऊर्ध्व लम्ब OY (Y–अक्ष) पर विस्थापन होंगे। OX पर एक विन्दु 12 लीजिये और कल्पना कीजिये 0–12 दूरी T sec. को व्यक्त करती है। इस दूरी को 1, 2,. . .विन्दुओं से 12 बराबर भागों में बांटिये तो प्रत्येक भाग $T/12$ sec. को दर्शायेगा। कण के धनात्मक विस्थापन X–अक्ष के ऊपर और ऋणात्मक विस्थापन उससे नीचे दर्शायेंगे।

मान लीजिये समय उस क्षण से नापा जाता है जब जनक विन्दु X पर और उसके संगत स० आ० गति युक्त विन्दु N अपनी मध्य स्थिति O पर है। तो $t=0$ के लिये विस्थापन $y=0$ हुआ। अतः ग्राफ का प्रथम विन्दु तो स्वयं O ही होगा। ग्राफ के अन्य विन्दु प्राप्त करने के लिये P_1, P_2, Y, P_4, . . . आदि से X–अक्ष के समान्तर क्षैतिज रेखायें खींचिये और 0–12 के बीच वाले 1, 2, 3–6 आदि सब विन्दुओं से ऊपर तथा 7, 8—12 विन्दुओं से X–अक्ष के नीचे की ओर लम्ब खींचिये। संगत रेखाओं के कटान विन्दु ही ग्राफ के अन्य विन्दु हैं। क्योंकि $t=T/12$ से० पर जनक विन्दु P_1 पर और N विन्दु N_1 पर होगा। अतः ग्राफ का दूसरा विन्दु P_1 से X–अक्ष के समान्तर और 1 पर के लम्ब का कटान विन्दु होगा। इसी प्रकार अन्य विन्दुओं के लिये 1 ग्राफ के सब विन्दुओं को एक चिकने लगातार वक्र से मिला देने से पूरे आवर्त्त काल के लिये एक वक्र बन जाता है। इसीको **समय-विस्थापन** (time-displacement) वक्र कहते हैं। इसकी आकृति 'ज्या वक्र' जैसी ही है। यही बात $y=r\sin\omega t$ समीकरण से स्पष्ट होती है।

2.6. **तरंग गति (Wave motion) :**—अब तक हमने एक अकेले कण की व्यक्तिगत गति का अध्ययन किया। अब हम किसी माध्यम (medium) की उस अवस्था पर विचार करेंगे जो उसके एक कण पर लगातार उद्वेलन (disturbance) के कारण होती है।

इस प्रसंग की विचारधारा को आसानी से समझने के लिये हम माध्यम का चित्रण बहुसंख्यक कणों के उस समुदाय से करेंगे जिसमें प्रत्येक कण अपने सब ओर निकटतम स्थित कण से अदृश्य सर्पिल कमानी (invisible spiral spring) द्वारा सम्बन्धित है। वास्तव में यह माध्यम की प्रत्यास्थता (elasticity) आत्मसात करने के लिये सहायक चित्र है।

अतः माध्यम का प्रत्येक कण अपनी मध्य स्थिति में ही रहना पसन्द करेगा। यदि किसी वाह्य कारण से किसी कण को उसकी मध्य स्थिति से किसी दिशा में विस्थापित किया जाय तो कण से बंधी हुई कुछ कमानी अपनी लम्बाई में बढ़ेंगी और कुछ लम्बाई में दबेंगी। कमानियों की प्रत्यास्थता के कारण उनके दूसरे सिरे पर स्थित कण सब ओर से दबाव डालकर उद्वेलित कण को उसकी मध्यस्थिति में लौटाने का प्रयत्न करेंगे। इसके फलस्वरूप वे सबके सब उसी प्रकार के उद्वेलन से प्रभावित हो जायेंगे। उनका उद्वेलन ठीक इसी प्रकार अब दूसरे पड़ोसियों पर पहुँच जायेगा और इस प्रकार एक कण पर प्रारम्भ किया गया उद्वेलन माध्यम के दूसरे और दूरस्थ भागों में पहुँच जायेगा। उद्वेलन का यह स्थानान्तरण एक निश्चित वेग से होगा जिसका मान माध्यम के भौतिक गुणों (जड़त्व व प्रत्यास्थता आदि) पर निर्भर करेगा।

माध्यम के एक स्थान से दूसरे स्थान को एक निश्चित वेग से उद्वेलन का स्थानान्तरण (transference) तरंग (wave) कहलाता है।

तरंग गति में माध्यम के कण तो केवल अपनी मध्यस्थिति के इधर-उधर दोलन ही करते हैं। स्थानान्तरण कणों अथवा माध्यम की संहति (mass) का नहीं वरन् उद्वेलन और उसकी ऊर्जा (energy) का होता है। परन्तु तरंग-गमन के समय माध्यम के समस्त कण अपनी अपनी मध्यस्थिति के इधर उधर एक लगातार (continuous) और स्थिर (constant) कलान्तर (phase difference) के साथ सरल आवर्त्त गति करते हैं। प्रथम कण (जिससे उद्वेलन प्रारम्भ होता है) की गति की समस्त कलायें (phases) माध्यम के समस्त कणों से होकर गुज़रती हैं परन्तु कोई विशेष कण किसी समय गति की किसी अवस्था में है यह उस कण की प्रथम कण से दूरी पर निर्भर करता है। तरंग-गमन के लिये आवश्यक है कि माध्यम के समस्त कण सहयोग दें। तरंग उस स्थान और उसी कण पर समाप्त हो जायेगी जो अपनी मध्यस्थिति से हटने के लिये स्वतन्त्र नहीं है। समान गति की कला रखने वाले परन्तु निकटतम कणों के बीच की दूरी को तरंग दैर्घ्य (wave length) कहते हैं। इसको ग्रीक अक्षर λ (लेमडा) से व्यक्त करते हैं। अंकों में यह वह दूरी है जो तरंग उतने समय में पूरा करती है जितने समय में व्यक्तिगत कण अपना दोलन पूरा करते हैं। इस समय को कण तथा तरंग दोनों का आवर्त्त काल कहते हैं।

2.7. **अनुप्रस्थ (Transverse) और अनुदर्घ्य (Longitudinal) तरंगें** :—पिछली धारा में हमने देखा कि माध्यम के कणों के दोलन से माध्यम में एक तरंग उत्पन्न हो जाती है। परन्तु कणों के दोलन और तरंग-गमन की आपेक्षिक दिशा के अनुसार दो प्रकार की तरंगें सम्भव हैं। अनुप्रस्थ (transverse) तरंगें जिनमें कणों के दोलन की दिशा तरंग-गति की दिशा के अभिलम्ब (normal) होती है और अनुदैर्घ्य (longitudinal) तरंगें जिनमें कण उसी दिशा के सामनान्तर दोलन करते हैं जिस दिशा में तरंग चलती है।

2.8 **अनुप्रस्थ तरंग (Transverse wave)** :—इन तरंगों के प्रसरण की प्रक्रिया (mechanism) समझने के लिये अग्रिम चित्र 5 पर ध्यान दीजिये। काले बिन्दु 1, 2, 3, ... 9 आदि माध्यम के 9 कण हैं जो परस्पर प्रत्यास्थ बलों (elastic forces) द्वारा जुड़े हैं। कण सं० 1 को T से० आवर्त्त काल की स० आ० ग० करने के लिये बाध्य किया गया है। पहली पंक्ति $T=0$ को व्यक्त करती है, जब समस्त कण अपनी मध्य स्थिति में स्थिर हैं और कण सं० 1 ऊपर की ओर गति प्रारम्भ करने ही वाला है। $T/8$ से० पश्चात् (दूसरी पंक्ति) कण 1 ऊपर कुछ दूर चल चुका है। 1 और 2 कणों के बीच वाली प्रत्यास्थ डोरी में खिंचाव बढ़ रहा है जिससे $t=T/8$ पर कण 2 ऊपर की ओर विस्थापन करने ही वाला है। $t=T/4$ से० पर कण 1 अपनी

ऊपर की ओर विस्थापन की चरम-सीमा पर है। इस समय तक 1 और 2 कणों के बीच तनाव इतना हो गया कि 1 का वेग घटते-घटते शून्य हो गया ; अब वह अपनी उल्टी यात्रा (नीचे की ओर) पर अग्रसर होगा। कण 2 के परिणामित ऊपर की ओर विस्थापन से 2 और 3 कणों में खिंचाव हुआ और अब 3 भी ऊपर की यात्रा के प्रारम्भ में है। $T/2$ से० में (चौथी पंक्ति) कण 1 तो अपनी मध्य स्थिति पर लौट आया और उस पर उत्पन्न उद्वेलन अब कण 5 तक पहुँच चुका है। वह अब ऊपर की ओर विस्थापित होने ही वाला है। कण 2 चरम स्थिति पर पहुँच कर लौट रहा है और कण 3 चरम स्थिति में है। इसी प्रकार बढ़ते-बढ़ते T से० में जब कि कण 1 अपना एक दोलन पूरा करके मध्य स्थिति में लौट आया है (नवीं पंक्ति), उद्वेलन कण सं० 9 तक पहुँच गया है। $t=T/2$ और $t=T$ तक की माध्यम की स्थितियाँ मध्यवर्ती पंक्तियों से दर्शाई गई हैं।

चित्र 5

धारा 2.6 के अनुसार T से० ही अनुप्रस्थ तरंग का आवर्त्त काल हुआ। और इतने समय में पार की हुई दूरी अर्थात् कण सं० 1 से कण सं० 9 का फासला उसका तरंग दैर्घ्य (wave length) हुआ। $t=T$ की स्थिति की जिसे 'दूरी-विस्थापन' (distance-displacement) वक्र कहते हैं, धारा 2·5 के 'समय-विस्थापन' ग्राफ से तुलना करने से उनमें सर्व-समिका (identity) मिलेगी। तरंग वक्र (wave-curve) वास्तव में ज्या वक्र (sine-curve) से मिलता जुलता है। इस वक्र में उच्चतम बिन्दु को तरंग का श्रृंग (crest) तथा निम्नतम बिन्दु को तरंग का गर्त्त (trough) कहते हैं। श्रृंग और गर्त्त पर स्थिति कणों की गति-कला (Phase of Motion) विपरीत होती है।

इस विवेचना से आपने देखा कि तरंग तो बायें से दायें की ओर प्रगतिशील है, परन्तु व्यक्तिगत कण अपनी मध्य स्थिति के दोनों ओर ऊपर नीचे दोलन करते रहते हैं। दोनों की गति की दिशायें 90° का कोण बनाती हैं।

पानी के धरातल पर (तालाब में पत्थर फेंकने से) चलने वाली तरंगें अनुप्रस्थ होती हैं। एक हल्की वस्तु जैसे कार्क का टुकड़ा पानी के धरातल पर डाल कर आप देख सकते हैं कि तरंग कार्क को पार करके आगे बढ़ जाती हैं, परन्तु कार्क अपने ही स्थान पर ऊपर-नीचे नाचता रहता है। तरंग के प्रसरण (propagation) में माध्यम की संहति (mass) स्थानान्तरित नहीं होती; बल्कि तरंग का रूप और उसकी ऊर्जा (energy) ही गमन करती हैं।

खिची हुई डोरी, तार अथवा ताँत में भी अनुप्रस्थ तरंगें उत्पन्न होती हैं।

अनुप्रस्थ तरंगों से माध्यम के कण मुड़ कर तरंग का रूप बनाते हैं। अत: इन तरंगों को उत्पन्न करने के लिये माध्यम में सुदृढ़ता (rigidity) का होना आवश्यक है। इसलिये यह तरंग ठोस में तथा द्रव की सतह पर चल सकती हैं। द्रव अथवा गैस के अन्दर कदापि उत्पन्न नहीं हो सकतीं।

2.9. **अनुदैर्ध्य तरंग (Longitudinal Wave)** :—नीचे दिये हुये चित्र की सहायता से इन तरंगों के प्रसरण की प्रक्रिया आसानी से समझी जा सकती है; चित्र 6 में फिर काले बिन्दुओं द्वारा माध्यम के 9 कणों (1, 2, 3...9) की एक पंक्ति

चित्र 6

दिखाई गई है। प्रत्येक कण अपने पड़ोसी से सर्पिल कमानी (Spiral spring) द्वारा जुड़े हैं। अनदेलित (undisturbed) स्थिति में समस्त कण एक दूसरे से

ऊपर की ओर विस्थापन की चरम-सीमा पर है। इस समय तक 1 और 2 कणों के बीच तनाव इतना हो गया कि 1 का वेग घटते-घटते शून्य हो गया ; अब वह अपनी उल्टी यात्रा (नीचे की ओर) पर अग्रसर होगा। कण 2 के परिणामित ऊपर की ओर विस्थापन से 2 और 3 कणों में खिंचाव हुआ और अब 3 भी ऊपर की यात्रा के प्रारम्भ में है। $T/2$ से० में (चौथी पंक्ति) कण 1 तो अपनी मध्य स्थिति पर लौट आया और उस पर उत्पन्न उद्वेलन अब कण 5 तक पहुँच चुका है। वह अब ऊपर की ओर विस्थापित होने ही वाला है। कण 2 चरम स्थिति पर पहुँच कर लौट रहा है और कण 3 चरम स्थिति में है। इसी प्रकार बढ़ते-बढ़ते T से० में जब कि कण 1 अपना एक दोलन पूरा करके मध्य स्थिति में लौट आया है (नवीं पंक्ति), उद्वेलन कण सं० 9 तक पहुँच गया है। $t=T/2$ और $t=T$ तक की माध्यम की स्थितियाँ मध्यवर्ती पंक्तियों से दर्शाई गई हैं।

चित्र 5

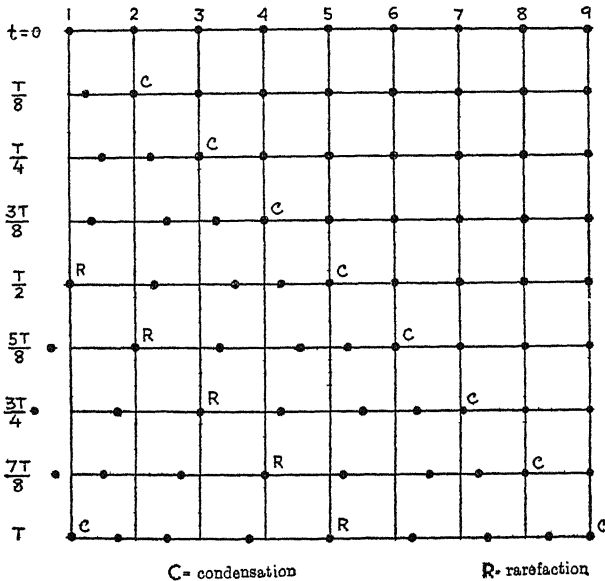
धारा 2.6 के अनुसार T से० ही अनुप्रस्थ तरंग का आवर्त्त काल हुआ। और इतने समय में पार की हुई दूरी अर्थात् कण सं० 1 से कण सं० 9 का फासला उसका तरंग दैर्घ्य (wave length) हुआ। $t=T$ की स्थिति की जिसे 'दूरी-विस्थापन' (distance-displacement) वक्र कहते हैं, धारा 2·5 के 'समय-विस्थापन' ग्राफ से तुलना करने से उनमें सर्व-समिका (identity) मिलेगी। तरंग वक्र (wave-curve) वास्तव में ज्या वक्र (sine-curve) से मिलता जुलता है। इस वक्र में उच्चतम बिन्दु को तरंग का शृंग (crest) तथा निम्नतम बिन्दु को तरंग का गर्त्त (trough) कहते हैं। शृंग और गर्त्त पर स्थिति कणों की गति-कला (Phase of Motion) विपरीत होती है।

इस विवेचना से आपने देखा कि तरंग तो बायें से दायें की ओर प्रगतिशील है, परन्तु व्यक्तिगत कण अपनी मध्य स्थिति के दोनों ओर ऊपर नीचे दोलन करते रहते हैं। दोनों की गति की दिशायें 90° का कोण बनाती हैं।

पानी के धरातल पर (तालाब में पत्थर फेंकने से) चलने वाली तरंगें अनुप्रस्थ होती हैं। एक हल्की वस्तु जैसे कार्क का टुकड़ा पानी के धरातल पर डाल कर आप देख सकते हैं कि तरंग कार्क को पार करके आगे बढ़ जाती हैं, परन्तु कार्क अपने ही स्थान पर ऊपर-नीचे नाचता रहता है। तरंग के प्रसरण (propagation) में माध्यम की संहति (mass) स्थानान्तरित नहीं होती; बल्कि तरंग का रूप और उसकी ऊर्जा (energy) ही गमन करती हैं।

खिची हुई डोरी, तार अथवा ताँत में भी अनुप्रस्थ तरंगें उत्पन्न होती हैं।

अनुप्रस्थ तरंगों से माध्यम के कण मुड़ कर तरंग का रूप बनाते हैं। अतः इन तरंगों को उत्पन्न करने के लिये माध्यम में सुदृढ़ता (rigidity) का होना आवश्यक है। इसलिये यह तरंग ठोस में तथा द्रव की सतह पर चल सकती हैं। द्रव अथवा गैस के अन्दर कदापि उत्पन्न नहीं हो सकतीं।

2.9. **अनुदैर्घ्य तरंग (Longitudinal Wave)** :—नीचे दिये हुये चित्र की सहायता से इन तरंगों के प्रसरण की प्रक्रिया आसानी से समझी जा सकती है; चित्र 6 में फिर काले बिन्दुओं द्वारा माध्यम के 9 कणों (1, 2, 3 . . . 9) की एक पंक्ति

चित्र 6

दिखाई गई है। प्रत्येक कण अपने पड़ोसी से सर्पिल कमानी (Spiral spring) द्वारा जुड़े हैं। अनदेलित (undisturbed) स्थिति में समस्त कण एक दूसरे से

एक निश्चित दूरी पर स्थित रहेंगे ; जैसा कि चित्र की पहली पंक्ति में दिखाया गया है। अब कण सं० 1 क्षैतिज दिशा में T से० के आवर्त्त काल की स० आ० गति करने को बाध्य किया जाता है। पहली पंक्ति में वह दाईं ओर चलने ही वाला है। $t=T/8$ से० पर कण 1 दाईं ओर बढ़ गया है जिससे कण 1 और 2 के बीच फासला बहुत कम हो गया है, वहाँ पर एक संपीडन (condensation) उत्पन्न हो गया है। माध्यम का घनत्व उस स्थान पर पहले की अपेक्षा बढ़ गया है। सर्पिल कमानी की लम्बाई घट गई गई है। प्रत्यास्थता (elasticity) के कारण वह कण 1 को बाईं ओर और कण 2 को दाईं ओर धक्का दे रही है। इससे कण 1 का वेग घटता जा रहा है और कण 2 दाईं ओर गति करने ही वाला है।

$t=T/4$ से० पर कण 1 का वेग घटते-घटते शून्य हो गया है (पंक्ति 3)। वह अपनी दाईं ओर की चरम सीमा पर है और अपनी गति के आयाम (amplitude) के बराबर विस्थापित होकर अब बाईं ओर लौटने ही वाला है। कण 2 अपनी मध्य स्थिति से दाईं ओर चल रहा है जिसके कारण अब कण 1 और 2 के बजाय कण 2 और 3 के बीच संपीडन उत्पन्न हो गया है। कमानी की प्रत्यास्थता से कण 3 अब दाईं ओर विस्थापित होने ही वाला है।

$t=T/2$ से० पर माध्यम की स्थिति चित्र की पाँचवीं पंक्ति में प्रदर्शित की गई है। $t=T/4$ से $t=T/2$ से० तक कण 1 का वेग बाईं ओर बढ़ता गया है। अब कण 1 लौट कर अपनी मध्यस्थिति पर आ गया है। उसका वेग अधिकतम है, अतः अपनी जड़ता (inertia) और गतिज ऊर्जा के कारण मध्यस्थिति पर ही न रुक कर बाईं ओर गति प्रारम्भ रखेगा। कण 1 अपने आयाम के बराबर दाईं ओर विस्थापित होकर पूर्व स्थिति की ओर लौट रहा है। संपीडन (condensation) अब कण 5 पर पहुँच गया है। परन्तु इसी समय कण 1 मध्यस्थिति से बाईं ओर जाने वाला है। कण 1 और 2 के बीच वैसे ही अनुद्वेलित स्थिति की अपेक्षा अधिक दूरी है। दूसरे कण 1 का वेग 2 की अपेक्षा अधिक है। अतः अब कण 1 के स्थान पर माध्यम में एक विरलन (rarefaction) का जन्म हो रहा है। माध्यम का घनत्व अपने साधारण मान से गिर गया है।

$t=5T/8$ से० (छठी पंक्ति) पर कण 1 अपनी मध्य स्थिति से बाईं ओर की यात्रा पर अग्रसर है। परन्तु कण 1 और 2 के बीच की कमानी की लम्बाई अपने साधारण मान से बढ़ने के कारण कण 1 पर दाईं ओर बल लगा रही है। उसका वेग घट रहा है। कण 2 अपनी पूर्व स्थिति पर लौट आया है और बाईं ओर चलने ही वाला है। कण 3 मध्यस्थिति से दाईं ओर है। अतः अब 2 और 3 के बीच विरलन उत्पन्न हो रहा है। परन्तु संपीडन की तरंग (wave) कण 6 तक पहुँच चुकी है।

$t=3T/4$ से० (सातवीं पंक्ति) पर कण 1 अपनी बाईं ओर की चरम सीमा से दाईं ओर चलने वाला है। विरलन (rarefaction) की तरंग कण 3 पर और संपीडन की तरंग कण 7 पर पहुँच चुकी है।

$t=T$ से० (नवीं पंक्ति) की स्थिति में कण 1 अपना एक दोलन पूरा करके मध्य-स्थिति पर लौट आया है और कण 2 बाईं ओर चरम स्थिति से मध्य स्थिति की ओर लौट रहा है। दोनों के बीच फिर एक दूसरे संपीडन (Condensation) का जन्म हो रहा है। परन्तु अब पहला संपीडन कण 9 तक पहुँच गया है और विरलन (Rarefaction) कण 5 तक। कण 1 और कण 9 गति की समान कला में हैं। अतः तरंग का तरंग दैर्घ्य (wave length) कण 1 और 9 के बीच की दूरी के बराबर हुआ।

हमने देखा कि तरंग क्षैतिज दिशा में बायें से दायें चली जा रही है और व्यक्तिगत कण भी क्षैतिज दिशा में अपनी-अपनी मध्यस्थिति के दायें-बायें दोलन कर रहे हैं। संपीडन और विरलन की तरंगें एक ही वेग से एक दूसरे के आगे पीछे एक ही दिशा में प्रगतिशील हैं। संपीडन और विरलन की स्थिति वाले कणों की कलायें परस्पर विपरीत हैं। अतः इनके बीच की दूरी $\lambda/2$ (तरंग दैर्घ्य की आधी) हुई।

अनुदैर्घ्य तरंगों (Longitudinal waves) के प्रसरण (propagation) के प्रसंग में भी हमने देखा कि माध्यम के कण केवल अपनी मध्यस्थिति पर ही दोलन करते रहते हैं और तरंग अपने रूप व ऊर्जा (energy) के साथ आगे बढ़ती जाती है।

संपीडन और विरलन में आयतन अथवा लम्बाई में ही थोड़ा-सा अन्तर आता है। अतः आयतन प्रत्यास्थता (volume elasticity) और यंग मापांक ही माध्यम में अवश्य होने चाहिये। इसलिये अनुदैर्घ्य तरंग ठोसें, द्रव अथवा गैस सब में चल सकती है।

अनुदैर्घ्य तरंगों के प्रदर्शन के लिए कुछ सरल उपक्रम—

(1) मान लीजिए किसी सीधी दरार (groove) में संगमरमर की गोलियों की एक श्रेणी है, जिसमें गोलियाँ एक दूसरे को छू रही हैं। यदि गोली को श्रेणी के एक सिरे की ओर खींचा जाय, तो एक दूसरी गोली, श्रेणी के दूसरे सिरे की ओर तीव्र गति से चल पड़ेगी। कारण यह है कि जब पहली गोली पर प्रहार पड़ेगा, तो वह क्षणिक संपीडन से प्रभावित होगी। अपनी आकृति पुनः प्राप्त करने में वह अपने आगे की गोली को संपीड़ित करेगी और यह क्रम पूरी श्रेणी में जारी रहेगा। अन्त में यह संपीडन सब से आगे की गोली पर पहुँचेगा। यदि पहले सिरे पर दो संस्पर्श करने वाली गोलियाँ तान कर लाई जायें, तो दो संपीडन तरंगें क्रम से प्रसरित होंगी।

(2) एक कमानी को किसी फ्रेम से लटकाने पर अनुदैर्घ्य तरंग मिल सकती है। कमानी के एक सिरे को ढकेलने से निकटवर्ती भाग संपीडन होता है। यह पुनरावस्थित होते समय अपने आगे के भाग को संपीडित करेगा। यह क्रम जारी रहेगा। यदि कमानी बहुत हल्की और दृढ़ है, तो संपीडन तरंग इतनी तेजी से चलेगी कि ठीक से दिखाई

भी न देगी, पर यदि वह पतले लोहे के तार की बनी है, और यदि लम्बाई की दिशा में उस पर जगह-जगह सीसे के छोटे टुकड़े संधृत (clamp).करके उस को बोझिल बना दिया जाय, तो संपीडन तरंग अवमन्दित होकर दिखाई देगी।

(3) **क्रोव्हा का मंडलक** (Crova's Dise)—एक छोटे वृत्त की परिधि पर समान दूरियों पर व्यवस्थित बिन्दु लो। किसी एक बिन्दु को केन्द्र मान कर एक वृत्त खींचो। फिर उसके बाद के बिन्दु को केन्द्र मान कर दूसरा वृत्त खींचों, जिसकी त्रिज्या पहले वाले वृत्त से कुछ अधिक हो। तत्पश्चात् अन्य बिन्दुओं को केन्द्र मान कर अन्य वृत्त खींचो। इन वृत्तों की त्रिज्याएँ क्रमवत् बढ़ती जाना चाहिए और उनमें निश्चित् अन्तर रहना चाहिए। एक गत्ते या धातु की पट्टी में एक आयताकार नली इस प्रकार काट ली जाती है कि खींचे हुए वृत्तों के छोटे भाग दिखाई दे सकें। बड़े वृत्तों को केन्द्र पर घुमाने से, प्रत्येक छोटा भाग नली की दिशा में आगे पीछे खिसकता है, और उसके मार्ग की लम्बाई उस छोटे वृत्त के व्यास के बराबर होगी, जिस पर केन्द्र-बिन्दु निर्धारित किए गए हैं। तब संपीडन और विरलन तरंग नली की काट की दिशा में एकानुवर्ती क्रम से चलती हुई प्रतीत होंगी।

(4) मान लीजिए तीन गाड़ियाँ और एक एंजिन एक दूसरे से जुड़े हुए हैं और प्रारंभ में उनके बफ़र (buffers) एक दूसरे को संस्पर्श कर रहे हैं। यदि उन बफ़रों (buffers) को संपीडित किया जाय, जिसमें कमानियाँ हैं, तो वे छोटी हो जायेंगी और गाड़ी की लम्बाई भी छोटी हो जायेगी। मान लो इंजिन पहली गाड़ी की ओर कुछ दूर चले, तो इंजिन और गाड़ी के बीच का बफ़र (buffer) भी छोटा हो जायगा। कमानियाँ छोटी होकर पहली गाड़ी को आगे की ओर ठेलेंगी। जब पहली गाड़ी आगे को खिसकेगी, तो इंजिन के किनारे की कमानियाँ कुछ शिथिल होती हैं, और दूसरी गाड़ी की ओर की कमानियाँ संपीडित होती हैं। पहली गाड़ी दोनों ओर के बराबर विपरीत दावों से रुकेगी नहीं, वरन् वह अपनी गतिज ऊर्जा के कारण आगे बढ़ती रहेगी। पहली और दूसरी गाड़ी के बीच की कमानियाँ संपीडित होकर गाड़ी को रोक देंगी। फिर दूसरी गाड़ी संपीडित होगी और उन्हीं क्रियाओं को दुहराएँगी। इस प्रकार संपीडन एक गाड़ी से दूसरी की ओर चलेगा।

2.10. **अनुदैर्ध्य तरंग का 'दूरी-विस्थापन' ग्राफ**:—अनुदैर्ध्य तरंग में किसी भी क्षण माध्यम के समस्त कणों के विस्थापन तथा कण विशेष की X–अक्ष पर दूरी के बीच ग्राफ़ खींचा जा सकता है। कठिनाई इसमें यह है कि कण और तरंग दोनों के गति की दिशा X–अक्ष ही है। चित्र की स्पष्टता और समझने में सुविधा के लिये मध्यस्थिति से दाईं ओर (धनात्मक) का विस्थापन X–अक्ष के ऊपर Y–अक्ष की धनात्मक दिशा में और बाईं ओर (मध्यस्थिति से) का विस्थापन X–अक्ष के नीचे Y–अक्ष की ऋणात्मक दिशा में दर्शाया जाता है। इस प्रकार प्राप्त हुआ वक्र आकृति में "ज्या वक्र" (sine curve) और पानी के धरातल पर उत्पन्न हुई तरंगों के अनुरूप होता है।

कुछ परिभाषायें

2.11. **तरंग का आवर्त्तकाल (Period) और आवृत्ति (Frequency)** :—दोनों प्रकार की तरंगों में माध्यम के व्यक्तिगत कणों की स० आ० ग० का आवर्त्तकाल और आवृत्ति ही तरंग का आवर्त्तकाल व आवृत्ति कहलाती हैं।

तरंग का आयाम (Amplitude) :—तरंग प्रसरण के समय स० आ० ग० करने वाले माध्यम के कणों का आयाम (अधिकतम विस्थापन) ही तरंग का आयाम कहलाता है।

तरंग का वेग (Velocity) :—एक आवर्त्त काल (T से०) में तय की हुई दूरी तरंग दैर्घ्य λ के बराबर होती है। अतः तरंग का वेग v अर्थात् 1 से० में पार की हुई दूरी λ/T सें० मी०/से० हुई। अब T से० में एक चक्र पूरा होता है, अतः 1 से० में की हुई पुनरावृत्तियाँ अर्थात् तरंग की आवृत्ति $n=1/T$ से०$^{-1}$ हुई। इस प्रकार,

$$v=\frac{\lambda}{T}$$

तथा $$v=n\lambda$$

अर्थात् तरंग-वेग=आवृत्ति ×तरंग दैर्घ्य

तरंग के कणों की कला (Phase) :—तरंग-दैर्घ्य की परिभाषा समान कला के निकटतम कणों के बीच की दूरी से की गई है। अतः दो कणों का कलान्तर उनकी X–अक्ष पर पारस्परिक दूरी को तरंग दैर्घ्य में व्यक्त करके भी बताया जा सकता है। λ दूरी पर स्थिति कणों में कलान्तर T अथवा 2π है। अतः x सें० मी० की दूरी पर के कणों का कलान्तर (phase difference) $\frac{x}{\lambda}T$ से० अथवा $\frac{x}{\lambda}2\pi$ हुआ।

2.12. **तरंग समीकरण (Wave Equation)** :—स० आ० ग० के अध्ययन में हमने देखा कि कण के विस्थापन और समय का सम्बन्ध $y=r\sin\omega t$ समीकरण द्वारा प्रकट होता है। इसमें r गति का आयाम और $\omega=2\pi n$ जनक-बिन्दु का कोणीय वेग (angular velocity) है। अतः यह समीकरण $y=r\sin 2\pi nt$ हुआ।

अब तरंग-प्रसरण में x दूरी पर स्थित कण और प्रथम कण की गतियों में $\frac{2\pi}{\lambda}x$ अथवा $\frac{T}{\lambda}x$ से० का कलान्तर होगा। दूसरे कण का विस्थापन जो इस क्षण है वही विस्थापन प्रथम कण के लिये $\frac{T}{\lambda}x$ से० पहले हुआ होगा। अतः x दूर पर के कण विस्थापन का समीकरण t के स्थान पर $\left(t-\frac{T}{\lambda}x\right)$ रखने से प्राप्त होगा। अर्थात्

$$y = r \sin 2\pi n \left(t - \frac{T}{\lambda} x \right)$$

$$= r \sin 2\pi \frac{n}{n\lambda} \left(n\lambda t - \frac{T}{\lambda} . \ n\lambda x \right)$$

[कोष्ठ के अन्दर व बाहर $n\lambda$ से गुणा करने पर]

अर्थात् $$y = r \sin \frac{2\pi}{\lambda} (v\,t - x)$$

$\because$ ($n\lambda = v$ तथा $nT = 1$)

इसी को तरंग-समीकरण (Wave Equation) कहते हैं। इसमें t और n दो परिवर्तनशील (Variable) राशियाँ हैं। t को स्थिर रख कर किसी भी क्षण माध्यम में विभिन्न दूरियों (x) पर स्थित कणों का विस्थापन प्राप्त हो सकता है। और इस प्रकार प्राप्त हुआ वक्र अवश्य ही ज्या वक्र होगा। इसी प्रकार x का कोई निश्चित मान रख कर किसी भी कण का "समय-विस्थापन" ग्राफ़ ज्ञात कर सकते हैं।

यह समीकरण अनुप्रस्थ और अनुदैर्घ्य दोनों तरंगों को व्यक्त कर सकता है। v को ऋणात्मक बनाने से X–अक्ष की ऋणात्मक दिशा में चलने वाली तरंग प्राप्त होती है।

सारांश

सरल आवर्त्त गति में कण का त्वरण विस्थापन का समानुपाती होता है और सदैव मध्य स्थिति की ओर दैशित रहता है। कण के विस्थापन का समीकरण $y = r \sin \omega t$ है।

तरंग दो प्रकार की होती हैं: (1) अनुप्रस्थ व (2) अनुदैर्घ्य। अनुप्रस्थ तरंग में माध्यम के कण तरंग के प्रसरण की दिशा के लम्बरूप दोलन करते हैं और अनुदैर्घ्य तरंग में प्रसरण की ही दिशा के समानान्तर।

तरंग का वेग = आवृत्ति × तरंग दैर्घ्य

$$v = n\lambda$$

तरंग समीकरण $y = r \sin \frac{2\pi}{\lambda} (vt - x)$ है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. आवर्त्त गति किसे कहते हैं? सरल आवर्त्त गति के लक्षण बताइये। स० आ० गति के समीकरण की स्थापना कीजिये।
2. स० आ० ग० की क्या पहचान है? साधारण लोलक की गति कैसी है? उसके आवर्त्तकाल के व्यंजक (expression) को निकालिये।
3. तरंग (wave) की परिभाषा कीजिये। तरंगें कितने प्रकार की होती हैं? उनकी परस्पर तुलना कीजिये।
4. अनुप्रस्थ तरंगें माध्यम में किस प्रकार गमन करती हैं? एक चित्र द्वारा इस प्रक्रिया को भली-भाँति समझाइये।

5. वायु में अनुदैर्घ्य तरंगों के प्रसरण की प्रक्रिया चित्र द्वारा समझाइये।
6. 512 आवृत्ति वाली एक तरंग 1120 फुट प्रति से० के वेग से चल रही है। उसका तरंग दैर्घ्य निकालिये। (उत्तर 2·1875 फुट)

अध्याय 3

ध्वनि-वेग

(Sound Velocity)

3.1. **ध्वनि एक अनुदैर्घ्य तरंग है** :—ध्वनि के निम्नलिखित गुणों के आधार पर यह स्थापित किया गया है कि ध्वनि पदार्थीय (material) माध्यम में एक अनुदैर्घ्य तरंग है।

1. ध्वनि निर्वात (शून्य, vacuum) स्थान में नहीं चल सकती। एक विद्युत-घंटी को बेलजार में रखकर चूषक-पंप की सहायता से बेलजार की वायु धीरे-धीरे निकालिये और घंटी को बजाइये। कुछ समय बाद घंटी की ध्वनि सुनाई देना बन्द हो जायेगी परन्तु आँख से आप स्पष्ट देख सकते हैं कि घंटी बज रही है।

ध्वनि को एक पदार्थीय माध्यम की आवश्यकता है। अतः स्पष्ट है कि ध्वनि तरंग के रूप में ही चलती होगी।

2. ध्वनि का वर्त्तन (Refraction) और परावर्त्तन (Reflection) ठीक उन्हीं नियमों के अनुसार होता है जो प्रकाश तथा ताप अथवा अन्य किसी तरंग के लिये लागू हो सकते हैं।

3. अपने मार्ग में आने वाली रुकावट (obstacle) (दीवार, या कोई मोड़) के गिर्द मुड़कर ध्वनि पुनः आगे बढ़ जाती है। जैसे तालाब के धरातल की तरंगें पत्थर के चारों ओर चक्कर लगाकर फिर आगे बढ़ने लगती हैं। इस घटना को "विवर्त्तन" (diffraction) कहते हैं।

4. दो समान ध्वनियाँ उपयुक्त दशाओं में मिलकर "शांति" (Silence) उत्पन्न कर सकती हैं। इसका प्रदर्शन क्विंके की नलिका (Quincke's Tube) से सुचारु ढंग से किया जा सकता है (आगे पढ़िये)। इस "व्यतिकरण" (Interference) की घटना को केवल तरंग के सिद्धान्त पर समझाया जा सकता है।

इन सब बातों से तो केवल इतना सिद्ध होता है कि ध्वनि एक तरंग है। परन्तु कैसी तरंग, अनुप्रस्थ अथवा अनुदैर्घ्य, इसका निर्णय नीचे की दो बातें करती हैं—

1. ध्वनि गैस (वायु), द्रव तथा ठोस सब में चल सकती है अतः यह एक अनुदैर्ध्य तरंग होनी चाहिये। क्योंकि गैस में तो अनुप्रस्थ तरंग उत्पन्न ही नहीं हो सकती। अनुप्रस्थ तरंग की उत्पत्ति के लिये माध्यम में 'सुदृढ़ता' (Rigidity) व "रूप–प्रत्यास्थता" (Elasticity of shear) होना अनिवार्य है जो गैस में अनुपस्थित है।

2. अनुप्रस्थ तरंग में कण प्रगति दिशा के लम्बरूप दोलन करते हैं और अनुदैर्ध्य में उसी दिशा के समान्तर। इससे ध्रुवीकरण (Polarization) की घटना केवल अनुप्रस्थ तरंगें ही दिखा सकती है अनुदैर्ध्य नहीं। प्रयोगों द्वारा यह निर्विवाद सिद्ध कर दिया गया है कि ध्वनि की तरंगों में ध्रुवीकरण नहीं होता। अतः ध्वनि एक अनुदैर्ध्य तरंग है जिसके प्रसरण के लिये पदार्थीय माध्यम अनिवार्य है।

3.2. **वायु में ध्वनि वेग ज्ञात करने के लिये किये गये प्रयोग** :—खुली हवा में ध्वनि का वेग ज्ञात करने का सर्व प्रथम सफल प्रयोग "पैरिस एकडेमी" ने सन् 1738 ई० में किया। लगभग 12 किलोमीटर (10 मील) के फासले पर दो ऐसे स्थान चुने गये जो आमने-सामने देखे जा सकते थे। एक प्रेक्षण-केन्द्र से तोप दागी गई और दूसरे केन्द्र पर उसके प्रकाश को देखने का समय घड़ी से पढ़ लिया गया। अब इसके बाद जब तोप के गर्जन की ध्वनि सुनाई दी तो फिर समय देखा गया। यह मानकर कि एक स्थान से दूसरे स्थान पर प्रकाश के जाने में कोई समय नहीं लगता ध्वनि द्वारा लिया हुआ समय t_1 से० ज्ञात हो गया। वायु-वेग के प्रभाव को दूर करने के लिये "पारस्परिक प्रेक्षण" (Reciprocal observation) विधि से दूसरे केन्द्र पर दागी गई तोप की चमक और ध्वनि के पहुँचने के समय में विपरीत दिशा में चलकर ध्वनि द्वारा लिया हुआ कुल समय t_2 से० ज्ञात कर लिया। अब यदि,

ध्वनि का वेग $= V$ फु०/से०
वायु का वेग $= v$ फु०/से०
केन्द्रों की दूरी $= x$ फु० हो तो—

$$V+v=\frac{x}{t_1} \text{ जब ध्वनि वायु की दिशा में चलती है।}$$

$$V-v=\frac{x}{t_2} \text{ जब ध्वनि वायु के विपरीत चलती है।}$$

$$\therefore \quad 2V = \frac{x}{t_1}+\frac{x}{t_1} \text{ (जोड़ने से)}$$

$$\text{और} \quad V = \frac{x}{2}\left(\frac{1}{t_1}+\frac{1}{t_1}\right) \text{ फुट/से०}$$

पैरिस एकेडेमी के बाद अरैगो (1829), ब्रैवे (1845), मार्टिन आदि ने भी बहुत से प्रयोग किये। विभिन्न ताप (temperature), दबाव (Pressure)

और आर्द्रता (Humidity) पर प्रयोग किये गये। इन सब का निष्कर्ष यह था कि—

(i) शुष्क और शांत वायु में साधारण वैधिक दबाव और $0^{\circ}C$ पर ध्वनि का वेग 332 मीटर/से० के लगभग है।

(ii) ध्वनि-वेग के मान पर वायुमंडल के दबाव के परिवर्तन का कोई प्रभाव नहीं होता।

(iii) ताप (temperature) बढ़ने से वेग बढ़ता है।

(iv) वायु की आर्द्रता बढ़ने से भी वेग में वृद्धि होती है।

3.3. **ध्वनि-वेग का सैद्धान्तिक सूत्र (Theoretical Formula) :—** प्रसिद्ध वैज्ञानिक न्यूटन ने "विभा-समीकरण" (dimensional equation) की सहायता से सैद्धान्तिक विवेचना में स्थापित किया कि किसी भी माध्यम में संपीडन (अथवा विरलन) की तरंग एक निश्चित वेग से चलती है। इस वेग का मान माध्यम के भौतिक गुणों (प्रत्यास्थता और घनत्व) पर निर्भर है। यदि तरंग-वेग u और माध्यम की प्रत्यास्थता E तथा घनत्व d हो तो न्यूटन के सूत्रानुसार,

$$U=\sqrt{E/d}$$

इसी अध्याय की धारा 1 की तर्कना और प्रयोगों के समर्थन से यह सिद्ध हो चुका था कि ध्वनि भी पदार्थीय माध्यम में एक अनुदैर्घ्य तरंग (संपीडन व बिरलन) के रूप में चलती है। अत: माध्यम (वायु) में ध्वनि का वेग u भी इसी सूत्र से ज्ञात होगा। अर्थात्

$$U=\sqrt{E/d}$$

यहाँ E माध्यम की "आयतन-प्रत्यास्थता" (volume-elasticity) है। जैसा कि हम जानते हैं—

$$\text{प्रत्यास्थता}=\frac{\text{चाँप (stress)}}{\text{विक्रिया (strain)}}$$

अब वायु की किसी संहति (mass) का दबाव P से $(P+p)$ करने से आयतन V से $(V-v)$ हो जाय तो—

$$\begin{aligned} \text{चाँप} &= \text{विक्रिया उत्पन्न करने वाला दबाव} \\ &= \text{दबाव में वृद्धि} \\ &= p \\ \text{और विक्रिया} &= \frac{\text{आयतन में कुल परिवर्त्तन}}{\text{पूर्व आयतन}} \\ &= v/V \\ \text{अत:}\quad E &= \frac{\text{चाप}}{\text{विक्रिया}} \end{aligned}$$

$$= \frac{p}{v/V}$$

वा $E = \frac{pV}{v}$ होगा ।

आगे न्यूटन ने तर्कना की कि संपीडन और विरलन की प्रक्रिया में वायु का ताप स्थिर रहता है । अतः E के स्थान पर "समतापीय प्रत्यास्थता" (isothermal elasticity) E_θ प्रयुक्त होनी चाहिये ।

अब समतापीय अवस्थाओं (isothermal conditions) में m ग्राम गैस (वायु) का दवाव P से $(P+p)$ कर देने से यदि आयतन V से $(V-v)$ हो जाय तो बायल के नियमानुसार,

$$PV = (P+p)\ (V-v)$$
$$= PV + pV - vP - vp.$$

परन्तु pv दो छोटी संख्याओं का गुणनफल होने के कारण नगण्य है ।

अतः $vP = pV$

या $P = \frac{pV}{v}$

परन्तु $E = \frac{pV}{v}$

$$\therefore\ E_\theta = P$$

अर्थात् "समतापीय प्रत्यास्थता" वायु के तत्क्षणीय (instantaneous) दबाव के बराबर होती है ।

इसलिये ध्वनि-वेग $U = \sqrt{P/d}$ होना चाहिये ।

उदाहरण के लिये साधारण वैधिक (Normal) ताप ($0°C$) व दबाव (पारे के 76 सें॰ मी॰) पर ध्वनि वेग की गणना करेंगे ।

$$P = 76 \times 13{\cdot}6 \times 981$$
$$= 1{\cdot}013 \times 10^6 \text{ डाइन/वर्ग सें॰ मी॰}$$

और $d = 0{\cdot}001293$ ग्राम/घन सें॰ मी॰

[$N.T.P.$ पर 1 लीटर वायु की संहति 1·293 ग्राम होती है ।]

अतः $U = \sqrt{P/d}$

$$= \sqrt{\frac{1{\cdot}03 \times 10^6}{0{\cdot}001293}}$$

$$= 280 \text{ मीटर/से॰ (लगभग)}$$

परन्तु प्रयोगों द्वारा निकाला हुआ ध्वनि का वेग 332 मीटर/से॰ है । वेग के सैद्धान्तिक और प्रयोगिक मानों का यह अन्तर इतना अधिक है कि इस अन्तर का

कारण प्रयोगिक त्रुटियाँ नहीं बताई जा सकतीं। अवश्य ही न्यूटन की तर्कना में कहीं कमी है।

लाप्लासीय संशोधन (Laplace's Correction)—लाप्लास ने कहा कि गणना और प्रयोग के फलों की भिन्नता का कारण न्यूटन का यह मान लेना है कि संपीडन (विरलन) की प्रक्रिया "समतापीय (isothermal) होती है। वास्तव में वायु के दबाव और आयतन का परिवर्तन इतना शीघ्र होता है कि संपीडन (विरलन) से उत्पन्न (शोषित) ताप बाहर नहीं जा पाता। इससे माध्यम का ताप स्थिर नहीं रह सकता। और यह प्रक्रिया "स्थिरोष्मीय" (adiabatic) होती है। अतः $U=\sqrt{E/d}$ में E माध्यम की 'स्थिरोष्मीय प्रत्यास्थता' (adiabatic elasticity) E_ϕ है "समतापीय" (Isothermal) E_θ नहीं। इस अवस्था में गैस के आयतन V और दबाव का सम्बन्ध,

$$PV^\gamma = \text{स्थिरांक होगा।}$$

$$\text{यहाँ } \gamma = \frac{C_p \text{ गैस (वायु) की स्थिर दबाव पर वि० उष्मा}}{C_v \text{ गैस की स्थिर आयतन पर वि० उष्मा}}$$

इस स्थिरांक γ का मान द्विपरमाणुवीय (diatomic) गैसों (जैसे आक्सीजन, नाइट्रोजन हाइड्रोजन, वायु आदि) के लिये 1·41 और एक परमाण्वीय (monoatomic) गैसों (जैसे आर्गन, क्रिप्टन) के लिये 1·66 है।

अतः संपीडन के कारण यदि दबाव P से $(P+p)$ होने से आयतन V से $(V-v)$ हो जाता है तो—

$$PV^\gamma = (P+p) \quad (V-v)^\gamma$$

$$= (P+p)\, V^\gamma \left(1 - \frac{v}{V}\right)^\gamma$$

$$\therefore \quad PV^\gamma = V^\gamma (P+p) \left(1 - \gamma \frac{v}{V} + \ldots \right)$$

[$\left(1-\frac{v}{V}\right)^\gamma$ को द्विपद सिद्धान्त (Binomial Theorem) से विस्तृत करके और $\frac{v}{V}$ की ऊँची घातों को नगण्य मानकर।]

$$\therefore PV^\gamma = PV^\gamma - \gamma PV^\gamma \frac{v}{V} + pV^\gamma - \ldots \left[\gamma p \frac{v}{V} . V^\gamma \text{ को नगण्य मानकर} \right]$$

$$\text{अतः,} \qquad \gamma PV^\gamma \frac{v}{A} = pV^\gamma$$

वा $\gamma P . \dfrac{v}{V}=p$ (V^{γ} से भाग देने से)

वा $\gamma P = \dfrac{pV}{v}$

परन्तु $E = \dfrac{pV}{v}$

$E\phi = \gamma P.$

अर्थात् स्थिरोष्मीय प्रत्यास्थता (adiabatic elasticity) गैस के तत्क्षणीय दवाव और γ के गुणनफल के वराबर होती है ।

अतः गैस 'वायु' में ध्वनि के वेग का संशोधित

सूत्र $U=\sqrt{\dfrac{\gamma P}{d}}$ हुआ ।

अब गणना से ध्वनि का वेग $U=\sqrt{\gamma}\times\sqrt{\dfrac{P}{d}}$

$=\sqrt{1{\cdot}41}\times 280$ मी०/से० ।

$=332$ मीटर/से० (लगभग)

हवा में ध्वनि-वेग का यह मान प्रयोगिक मान के ही बराबर है अतः लापलास की तर्कना ही ठीक सिद्ध हुई ।

3.4. **ध्वनि-वेग को प्रभावित करनेवाली बातें**—प्रयोगों से प्राप्त हुए निष्कर्ष की जाँच करने के लिये वायु के दबाव, ताप, और आर्द्रता के प्रभावों को अध्ययन करेंगे ।

दवाव का प्रभाव—गैस की दी हुई संहति का दबाव बदलने के साथ-साथ उसका आयतन और घनत्व दोनों बदल जाते हैं। वायु का ताप स्थिर रहते हुए माना कि दवाव P_1 पर ध्वनि वेग U_1 और दबाव P_2 पर वेग U_2 है। P_1 दबाव पर m ग्राम वायु का आयतन V_1, और घनत्व d_1 है तथा P_2 दबाव पर V_2 व d_2 हैं। तो—

$$U_1=\sqrt{\frac{\gamma P_1}{d_1}},\qquad U_2=\sqrt{\frac{\gamma P_2}{d_2}}$$

परन्तु वायल के नियम से,

$$P_1V_1=P_2V_2$$

तथा $m=V_1d_1=V_2d_2$ संहति

$$\frac{P_1V_1}{V_1d_1}=\frac{P_2V_2}{V_2d_2}$$

वा $\dfrac{P_1}{d_1}=\dfrac{P_2}{d_2}$

$$\therefore \quad \sqrt{\frac{\gamma P_1}{d_1}}=\sqrt{\frac{\gamma P_2}{d_2}}$$

अथवा $\quad U_1=U_2$

अर्थात् वायु का दबाव बदलने से ध्वनि वेग के मान में कोई परिवर्त्तन नहीं होता।

ताप का प्रभाव (Effect of temperature) :—ताप के प्रभाव का अध्ययन करते समय हम दबाव को स्थिर मानेंगे। अब यदि वायु का ताप बढ़ता है तो घनत्व घट जायेगा जिससे ध्वनि का वेग बढ़ जायेगा। मान लीजिये $0^\circ C$ ताप पर ध्वनि का वेग U_0, m ग्राम वायु का आयतन V_0 और घनत्व d_0 है। तथा $t^\circ C$ पर वेग U_t आयतन Vt और घनत्व d_t हैं। अतः,

$$U_0=\sqrt{\frac{\gamma P}{d_0}} \qquad U_t=\sqrt{\frac{\gamma P}{d_t}}$$

$$\therefore \quad \frac{U_t}{U_0}=\sqrt{\frac{d_0}{d_t}}$$

परन्तु चार्ल्स के नियम से,

$$V_t=V_0(1+\alpha t)$$

यहाँ α= वायु का आयतन प्रसार गुणक

$$=0{\cdot}00366$$

और $\quad m=V_td_t=V_0d_0$

$$\therefore \quad \frac{V_t}{V_td_t}=\frac{V_0(1+\alpha t)}{V_0d_0}.$$

$$\text{वा } \frac{d_0}{d_t}=(1+\alpha t)$$

$$\text{अतः } \frac{U_t}{U_0}=\sqrt{\frac{d_0}{d_t}}=(1+\alpha t)^{\frac{1}{2}}$$

क्योंकि α बहुत छोटा है, अतः $\alpha t \angle \angle 1$ होगा और $(1+\alpha t)^{\frac{1}{2}}$ को द्विपदीय सिद्धान्त से विस्तृत कर सकते हैं।

$$\therefore \quad \frac{U_t}{U_0}=(1+\tfrac{1}{2}\alpha t+--)$$

(αt की ऊँची घातों को छोड़कर)

अथवा $\quad U_t=U_0(1+{\cdot}00183\ t)$

($\alpha={\cdot}00366$ रखकर)

$$\therefore \quad (U_t-U_0)=U_0\times 0{\cdot}00183\ t$$

अब हम जानते हैं कि ध्वनि का $0^\circ C$ पर वेग 332 मी०/से० अथवा 1100 फुट/से० होता है। अतः U_0 का यह मान रखकर—

$$(U_t - U_0) = 2 \times t \text{ फुट/से०}$$
$$= 0{\cdot}6 \times t \text{ मीटर/से०}$$

अर्थात् वायु का ताप $1^\circ C$ $[t=1]$ बढ़ने पर ध्वनि का वेग 2 फुट/से० अथवा 0·6 मी०/से० बढ़ जाता है।

आर्द्रता (Humidity) का प्रभाव :—क्योंकि जलवाष्प समान ताप और दवाव वाली शुद्ध वायु की अपेक्षा 0·625 गुना भारी होती है अतः वायु में आर्द्रता (जल वाष्प) बढ़ने से उसका परिणामित घनत्व घट जायगा। इससे आर्द्र वायु में शुष्क वायु की अपेक्षा ध्वनि का वेग अधिक होगा।

मान लीजिये किसी समय वायु मंडल का ताप $t^\circ C$ और दबाव P है। इस समय शुष्क वायु में ध्वनि का वेग u_d और आर्द्र वायु में u_m है। शुष्क वायु का घनत्व d और आर्द्र का d_m है।

उपस्थित जलवाष्प का दबाव $= e$ सें० मी० (पारे के)

परन्तु आर्द्र वायु का पूर्ण दवाव $= P$ सें० मी० (,, ,,)

∴ शुष्क वायु का आंशिक (partial) दबाव $= (P-e)$ सें० मी० (पारे के)

अब $d_m = 1$ घन सें० मी० आर्द्र वायु की संहति।

$= 1$ घ० सें० मी० $(P-e)$ दबाव वाली शुष्क वायु की संहति

$+1$ घन सें० मी० e दबाव वाली जल वाष्प की संहति।

$= \left(\frac{P-e}{P}\right)$ घन सें० मी० P दबाव वाली शुष्क वायु की संहति

$+\frac{e}{P}$ घन सें० मी० P दबाव वाली जलवाष्प की संहति।

$$= \left(\frac{P-e}{P}\right) d + \frac{e}{P} \times {\cdot}625d$$

या $$d_m = \frac{d}{P}[(P-e) + {\cdot}625e]$$

$$= \frac{d}{P}(P - {\cdot}375e)$$

$$\therefore \frac{d_m}{d} = \frac{P - {\cdot}375e}{P}$$

$$= \left(1 - {\cdot}375\frac{e}{P}\right)$$

अब $U_d = \sqrt{\frac{\gamma P}{d}}$, $U_m = \sqrt{\frac{\gamma P}{d_m}}$

$$\therefore \frac{U_d}{U_m} = \sqrt{\frac{d_m}{d}}$$

$$= \left(1 - \cdot 375 \frac{e}{P}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore \frac{U_m}{U_d} = \left(1 - \cdot 375 \frac{e}{P}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$= 1 - (-\tfrac{1}{2}) \times \cdot 375 \ \frac{e}{P} + \frac{e}{P} \text{ की ऊँची घातें}$$

$$= 1 + 0\cdot 1875 \frac{e}{P}$$

अथवा $U_m = U_d \left(1 + \cdot 1875 \frac{e}{P}\right)$

इस समीकरण से स्पष्ट है कि आर्द्रता [e] बढ़ने पर ध्वनि का वेग बढ़ेगा।

उदाहरण—बिजली की कौंध (flash) से 6 सेकेंड पश्चात् उसकी कड़कड़ाहट सुनाई देती है। यदि वायु का ताप 27° सेंटीग्रड हो, तो विद्युत्-उत्पत्ति के स्थान की दूरी बताइये (V_0=332 मी० प्र० से०)।

प्रकाश का वेग ध्वनि-वेग से इतना अधिक है कि विद्युत् की कौंध के प्रकाश द्वारा प्रेक्षक तक पहुँचने में लिया गया समय नगण्य माना जा सकता है। अतः कड़कड़ाहट के स्रोत से प्रेषक तक 6 से० में ध्वनि पहुँचती है।

स्रोत की दूरी = ध्वनि वेग × समय

$$S = U_t \times t$$

परन्तु $U_t = U_0 (1 + \tfrac{1}{2} \alpha t)$.

$$= U_0 + \tfrac{1}{2} U_0 \alpha t$$

$$U_{27} = 332 + 332 \times \cdot 00183 \times 27$$

$$= 332 + 16\cdot 2$$

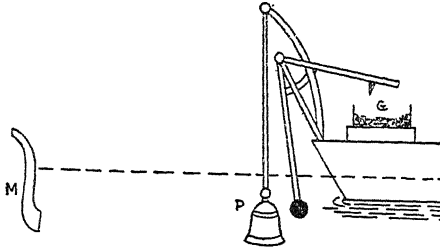
$$= 348\cdot 2 \text{ मी०/से० (लगभग)}$$

अतः ध्वनि स्रोत की दूरी $= 348\cdot 2 \times 6$

$= 2089\cdot 2$ मीटर

3.5. अन्य माध्यमों में ध्वनि का वेग—

पानी में :—कोल्डन और स्टर्म ने 1825 में जिनेवा झील में प्रयोग करके पानी में ध्वनि का वेग 8·1°C पर 1437 मी०/से० प्राप्त किया। उन्होंने दो नावें ली। एक

नाव से पानी में घंटी लटकाई दूसरी पर एक कीप के आकार का हाइड्रोफोन लटकाया।

चित्र 7

घंटी बजाने के साथ ही लीवरों की सहायता से बारूद को भी विस्फोट कराया गया। दूसरी नाव पर विस्फोट की चमक और हाइड्रोफोन से सुनी हुई घंटी की ध्वनि के पहुँचने के समयान्तर और नावों की दूरी से वेग ज्ञात किया गया।

सैद्धान्तिक सूत्र से किसी द्रव में ध्वनिवेग $U = \sqrt{E/d}$ होना चाहिये।

यहाँ E द्रव का "आयतन प्रसार गुणक" है और d घनत्व।

पानी के लिये $E = 2 \cdot 23 \times 10^{10}$ डाइन/वर्ग सें० मी०

और, $d = 1$ ग्राम/घन सें० मी०

अत: $U = \sqrt{\frac{2 \cdot 23 \times 10^{10}}{1}}$

$= 1 \cdot 49 \times 10^5$ से० मी०/से०

$= 1490$ मी०/से० हुआ

ठोस में ध्वनि वेग—लोहे की कई नलियों (Pipes) को जोड़ कर एक 900 मी० के लगभग लम्बी नली बना कर वायट ले प्रयोग किया। एक सिरे पर ध्वनि उत्पन्न की गई और दूसरे सिरे पर दो ध्वनियाँ सुनी गईं एक तो नली की वायु में हो कर और दूसरी नली की दीवारों में हो कर। दोनों के समयान्तर से वेग की गणना की गई। इसका मान लगभग 5300 मी०/से० आया।

कुंड की नलिका से भी प्रयोग करके किसी भी ठोस की बनी इकसार छड़ में ध्वनि-वेग सरलता से ज्ञात हो सकता है।

सैद्धान्तिक विचार से वेग,

$U = \sqrt{E/d}$ होता है।

परन्तु छड़ में जब ध्वनि चलती है, तो उसकी लम्बाई में ही थोड़ा-सा अन्तर आता है। अत: E के स्थान पर पदार्थ के यंग मापांक (Y) का मान रखना चाहिये।

स्पात (steel) के लिये,

$Y = 2 \cdot 16 \times 10^{12}$ डाइन/वर्ग से० मी०

$d = 7 \cdot 6$ ग्राम/घन सें० मी०

$\therefore \quad U = \sqrt{\frac{2 \cdot 16 \times 10^{12}}{7 \cdot 6}}$

$= \cdot 533 \times 10^6$ से० मी०/से०

$= 5330$ मी०/से०

विभिन्न गैसों में ध्वनि वेग—कुंड की नली में विभिन्न गैसीय माध्यमों में ध्वनि का वेग निकाला जा सकता है। (आगे पढ़िये)

मान लीजिये दो A और B गैसों के लिये क्रमशः,

वेग $= V_A \;,\; V_B$

$\gamma = \gamma_A \;,\; \gamma_B$

$d = d_A \;,\; d_B$

यदि दोनों का वेग एक ही दबाव और ताप पर निकाला गया हो,

$$\text{तो,}\quad V_A = \sqrt{\frac{\gamma_A P}{d_A}}, \qquad V_B = \sqrt{\frac{\gamma_B P}{d_B}}$$

$$\therefore \quad \frac{V_A}{V_B} = \sqrt{\frac{\gamma_A}{\gamma_B} \times \frac{d_B}{d_A}}$$

यदि दोनों के अणुओं में परमाणुओं की संख्या समान हो, तो

$$\gamma_A = \gamma_B$$

$$\text{तथा} \quad \frac{V_A}{V_B} = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}}$$

उदाहरण—हाइड्रोजन गेस में $0°C$ पर ध्वनि के वेग की गणना कीजिये यदि 1 लिटर हाइड्रोजन का भार 0·0896 ग्राम तथा 1 लिटर वायु का भार 1·293 ग्राम हो और $0°C$ पर वायु में ध्वनि का वेग 332 मी०/सें० हो।

क्योंकि हवा (नाइट्रोजन, ऑक्सीजन) और हाइड्रोजन दोनों द्विपरमाणुवीय गैसें हैं। अतः दोनों के लिये

$$\gamma_H = \gamma \text{ वायु} = 1 \cdot 41$$

$$\therefore \quad \frac{V_H}{V \text{ वायु}} = \sqrt{\frac{d \text{ वायु}}{d_H}}$$

परन्तु d वायु $= 0 \cdot 001293$ ग्राम/घ० सें० मी०.

d_H $= 0 \cdot 0000896$ ग्राम/घ० सें० मी०

$$\therefore \quad \frac{V_H}{V \text{ वायु}} = \sqrt{\frac{\cdot 001293}{\cdot 0000896}}$$

$$= \sqrt{\frac{12930}{896}}$$

$$= \sqrt{14 \cdot 43}.$$

$$= 3 \cdot 8.$$

$$\therefore \quad V_H = 3{\cdot}8 \times V \text{ वायु}$$
$$= 3{\cdot}8 \times 332$$

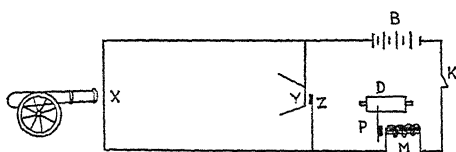
$0°C$ पर हाइड्रोजन में ध्वनि-वेग $= 1261{\cdot}6$ मी०/सें०

3.6. **वायु में ध्वनि वेग के लिये आधुनिक प्रयोग**—पैरिस एकेडेमी अथवा अरैगो आदि के प्रयोगों में मुख्य दो दोष थे—

(i) वायु-वेग का प्रभाव।

(ii) वैयक्तिक अशुद्धि (personal error)।

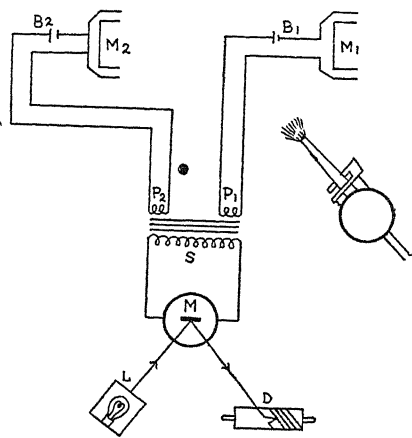
प्रथम दोष को तो "पारस्परिक प्रेक्षण" (reciprocal observation) विधि से दूर कर लिया गया। परन्तु दूसरा दोष फिर भी अनिश्चित रहा। प्रेक्षक पहले तो प्रकाश देख कर विराम घड़ी (stop watch) को चलाता है, पुन: ध्वनि सुन कर घड़ी को वन्द करता है। चक्षु-इन्द्रीय (sight) ज्ञान प्रकाश-स्नायु (optical nerve) से मस्तिष्क तक जाने, वहाँ से हाथ की पेशियों (muscles) को आज्ञा होने, और उसके पालन में समय लगता है। फिर ऐसा ही बिलम्ब श्रवणेन्द्रीय ज्ञान के अंकित करने में होता है। यह दोनों अशुद्धियाँ मिल कर "वैयक्तिक अशुद्धि" (personal error) कहलाती हैं। 1/5 से० से 1/15 से० तक कुछ भी इसका मान हो सकता है। भिन्न-भिन्न व्यक्तियों के लिये यह भिन्न होती है यहाँ तक कि एक ही प्रेक्षक के लिये इसका मान व्यक्ति की शारीरिक व मानसिक अवस्था के साथ बदल जाता है। यह अशुद्धि इतनी अनिश्चित और अविश्वसनीय है कि किसी भी वैज्ञानिक प्रेक्षण में आत्मचालित (automatic) उपकरणों का प्रयोग सर्वोत्तम समझा जाता है। इसी दृष्टिकोण से रैनो (Regnault) और मिलर (Miller) के प्रयोग उल्लेखनीय हैं।

रैनो की विधि (Regnault's method)—उपकरण—जैसा कि चित्र से स्पष्ट है X और Y एक प्रकार से दो प्रेक्षण स्थान हैं। X पर एक बहुत ही नाज़ुक परन्तु विद्युत सुचालक पर्दा है। Y पर एक शंकु के आकार (conical) का संग्राही यंत्र है। इसके ठीक पीछे बड़ी होशियारी से समायोजित (adjusted) धातु-बिन्दु (metalic point) Z है। संग्राही यंत्र पर लगा हुआ धातु का पर्दा Z के बहुत पास है। B एक बैटरी है, M एक विद्युत्-चुम्बक और D एक बेलन है जिसके ऊपर कपूर जला कर कालिख की तह जमा दी जाती है। यह बेलन अपनी अक्ष पर घूमने के साथ-साथ धीरे-धीरे आगे भी बढ़ता जाता है।

चित्र 8

प्रयोग करते समय चित्र की भाँति विद्युत्-परिपथ (circuit) पूरा कर दिया जाता है। कुंजी K को दबाने से विद्युत् तार में हो कर X और विद्युत् चुम्बक M से गुजरती है। लोहे की सुई P विद्युत्-चुम्बक की ओर खिंच कर बेलन की कालिख खुरच कर लगातार रेखा बनाती रहती है। अब X के ठीक सामने रखी हुई तोप दागी जाती है। विस्फोट की उद्घोषित ध्वनि से वायु में उत्पन्न हुये उद्वेलन से X पर्दा फट जाता है। विद्युत् परिपथ टूट जाने से M का चुम्बकत्व नष्ट हो जाता है। P पीछे हट जाती है और बेलन पर एक चिह्न वन जाता है। ध्वनि X से चल कर कुछ समय के बाद Y पर आती है। इससे संग्राही यंत्र का पर्दा हिलता है और Z से विद्युत् सम्बन्ध हो जाता है, अतः विद्युत्-परिपथ फिर पूरा हो जाता है। M के चुम्बकित होने से P फिर खिचती है और D पर पुनः एक चिह्न बन जाता है।

बेलन परिभ्रमण की नियन्त्रित गति से दोनों चिह्नों के बीच की दूरी नाप कर यह गणना की जाती है कि ध्वनि ने X से Y तक आने में कितना समय लिया। अब X और Y के बीच की दूरी नाप कर ध्वनि का वेग निकाल लिया जाता है।

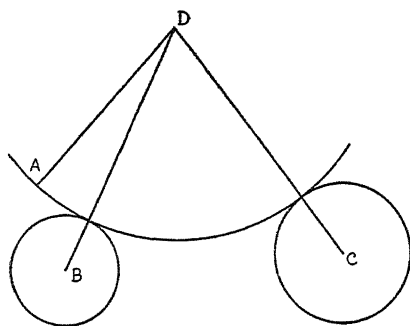
"पारस्परिक प्रेक्षण" की विधि से वायु वेग का प्रभाव दूर किया जा सकता है।

मिलर (Miller) की विधि:—माइक्रोफोन M_1 और M_2 परस्पर लगभग 8 किलोमीटर दूर हैं। इनको क्रमशः B_1 और B_2 बैटरियों से जोड़ कर दो पृथक्-पृथक् प्राथमिकों (Primaries) P_1 और P_2 से सम्बन्धित कर दिया जाता है। P_1 और P_2 के ऊपर एक द्वैतयिक (Secondary) कुण्डली लपेटते हैं जो स्वयं एक सुग्राहक धारामापी G से जुड़ा रहता है। धारामापी के दर्पण M से परावर्तित होकर लैम्प L का प्रकाश बेलन D पर पड़ता है। D अपनी अक्ष पर समरूप गति से परिभ्रमण करता हुआ थोड़ा-थोड़ा आगे भी सरकता रहता है। इससे D पर लिपटी हुई फोटोग्राफ-फिल्म पर प्रकाश से स्पष्ट अलग-अलग सरल रेखा बनती चली जाती हैं।

चित्र 9

बन्दूक को दागने से विस्फोट की ध्वनि जब M_1 पर पहुँचती है, तो P_1 में विद्युत् धारा की शक्ति बदलती है और प्रेरण (Induction) से द्वैतीयक में विद्युत् धारा उत्पन्न हो जाती है। दर्पण M अपनी सामान्य स्थिति से विचलित हो जाता है और D पर अंकित प्रकाश रेखा एकदम मुड़ जाती है। इसके बाद जब ध्वनि M_2 पर पहुँच

जाती है, तो P_2 में धारा-शक्ति में परिवर्तन होने से फिर द्वैतीयक में धारा उत्पन्न होती है और पुनः D पर एक मोड़ अंकित हो जाता है। दोनों मोड़ों की स्थिति से M_1 से M_2 तक जाने में ध्वनि द्वारा लिया गया समय ज्ञात हो जाता है। M_1 और M_2 के बीच की दूरी नाप कर ध्वनि के वेग की गणना की जाती है।

3.7. **उद्घोषिता और आवृत्ति का ध्वनिवेग पर प्रभाव**:—आधुनिक प्रयोगों द्वारा यह ज्ञात हुआ है कि अधिक उद्घोषित ध्वनि (जैसे विस्फोट) साधारण ध्वनि की अपेक्षा कुछ अधिक वेग से चलती है। परन्तु ध्वनि की आवृत्ति का कोई प्रभाव नहीं होता। तीक्ष्ण से तीक्ष्ण (ऊँची आवृत्ति) और गम्भीर से गम्भीर (नीची आवृत्ति) ध्वनियाँ सभी एक ही वेग से चलती हैं। यही कारण है कि वर्त्तन द्वारा प्रकाश तरंगों का विक्षेपण (dispersion) हो जाता है, परन्तु ध्वनि तरंगों में विक्षेपण नहीं होता।

3.8. **ध्वनि-उत्पादक की स्थिति ज्ञात करना (Sound Ranging)** :—प्रथम महायुद्ध (1914-18) में शत्रु की तोपों की स्थिति ज्ञात करने के लिये ध्वनि-तरंगों का प्रयोग किया गया। उत्पादक से ध्वनि तरंग का मुख-पृष्ठ (wave front) लगातार आकार में बढ़ते हुये गोले (sphere) के रूप में चलता है। तीन प्रेक्षण-बिन्दुओं पर ध्वनि पहुँचने के समयान्तर से उत्पादक की स्थिति का पता लगाया जा सकता है।

चित्र 10

होशियारी से चुने गये तीन प्रेक्षण केन्द्रों $A,B,C,$ पर टेलीफोन-प्रेषी (transmitter) लगा दिये जाते हैं। इनका सम्बन्ध हेडक्वार्टर पर रखे हुये तीन भिन्न-भिन्न अभिलेखक (Recording) यन्त्रों से होता है। तोप की गड़गड़ाहट की ध्वनि $A,B,C,$ पर विभिन्न समयों पर पहुँचती है, जो हेडक्वार्टर पर अंकित हो जाते हैं।

मान लीजिये कि ध्वनि के A पर पहुँचने के क्षण से t_1 से० पश्चात् B पर और t_2 से० पश्चात् C पर ध्वनि पहुँचती है। अतः जिस क्षण ध्वनि A पर पहुँची तो गोलाकार तरंग मुख-पृष्ठ (wave-front) B से 332 t_1 मीटर और C से 332 t_2 मीटर दूर था। B और C को केन्द्र मान कर क्रमशः 332 t_1 और 332 t_2 मीटर के अर्द्धव्यास से एक-एक वृत्त खींचिये। तो स्पष्ट है कि A से गुज़रने वाला और B व C से खींचे गये वृत्तों को स्पर्श करने वाला वृत्त तरंग मुख-पृष्ठ (wave-front) की तात्क्षणिक स्थिति को व्यक्त करेगा। इसके केन्द्र D पर ही ध्वनि उत्पादक तोप स्थित होगी।

सारांश

ध्वनि पदार्थीय माध्यम में एक अनुदैर्घ्य तरंग है। माध्यम में ध्वनि-वेग माध्यम की प्रत्यास्थता और घनत्व के अनुपात के वर्गमूल के बराबर होता है।

$$\text{वेग}=\sqrt{\frac{\text{प्रत्यास्थता}}{\text{घनत्व}}}$$

गैस में ध्वनि-वेग के लिये न्यूटन का सूत्र

$$U=\sqrt{\frac{P}{d}} \qquad \begin{array}{l} P=\text{गैस का दबाव} \\ d=\text{गैस का घनत्व} \end{array}$$

और लाप्लास का संशोधित सूत्र

$$U=\sqrt{\frac{\gamma P}{d}} \qquad \gamma=\frac{C_p}{C_v} \text{ है।}$$

गैस के दबाव का ध्वनि-वेग पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता।

आर्द्रता बढ़ने से वेग बढ़ता है।

वायु का $1^\circ C$ ताप बढ़ने से 2 फुट/से० वा 0·6 मी०/से० वेग बढ़ जाता है।

वायु में $0^\circ C$ पर ध्वनि का वेग 332 मी०/से० के लगभग होता है।

तीन स्थानों पर ध्वनि के पहुँचने का समय ज्ञात होने से ध्वनि उत्पादक की स्थिति ज्ञात हो सकती है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. यह आप कैसे सिद्ध करेंगे कि ध्वनि पदार्थीय माध्यम में एक अनुदैर्घ्य तरंग है ?
2. गैस में ध्वनि वेग के लिये न्यूटन का सूत्र क्या है ? लाप्लास ने इसमें क्या संशोधन किया ? उसकी तर्कना को स्पष्ट समझाइये।
3. ध्वनि-वेग के लिये लाप्लास के सूत्र की विवेचना कीजिये। इस सूत्र की सहायता से ध्वनि वेग पर गैस के दबाव और ताप के प्रभाव को समझाइये।
4. ध्वनि तरंगों की सहायता से शत्रु की तोप की स्थिति ज्ञात करने की विधि को स्पष्ट चित्र बना कर समझाइये।
5. गैस में ध्वनि के वेग के लिये न्यूटन का व्यंजक बताओ और उन कारणों को स्पष्टतया समझाओ जिससे लाप्लास को उस व्यंजक में परिवर्तन करना पड़ा।

   जिस दिन वायु में ध्वनि का वेग $3{\cdot}40\times10^4$ सें० मी० प्रति से० होता है और वायु का घनत्व 1.22×10^{-3} ग्राम प्रति घन सें० मी०, उस दिन वायुमंडल का निपीड (दबाव) ज्ञात करो। स्थिर निपीड पर और स्थिर आयतन पर वायु की विशिष्ट उष्माओं की निष्पत्ति 1·41 मान ली जा सकती है।

   [यू० पी० बोर्ड 1955] **(उत्तर** 75·07 सें० मी०)
6. वायु में ध्वनि-वेग निकालने की विधि जो आप जानते हैं वर्णन कीजिये।

   $0^\circ C$ और 74 सें० मी० निपीड पर शुष्क वायु में ध्वनि का वेग 330 मी०। से० है। $50^\circ C$ और 77·5 सें० मी० दबाव पर ध्वनि वेग की गणना कीजिये।

   [यू० पी० बोर्ड 1939]। **(उत्तर** 360 मी०/से०)

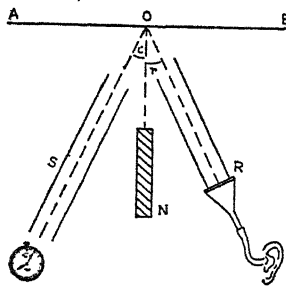
7. ऑक्सीजन और नाइट्रोजन के घनत्व में 16 : 14 का अनुपात है। जितना वेग $15°C$ पर नाइट्रोजन में है उतना ही वेग ऑक्सीजन में किस ताप पर होगा ?
[लंदन यूनीवर्सिटी] (**उत्तर** $56·14°C$)

अध्याय 4

परावर्त्तन, वर्त्तन तथा व्यतिकरण

(Reflection, Refraction and Interference)

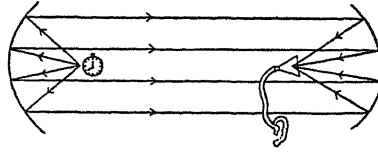
4.1. **परावर्त्तन**—प्रकाश और ताप की तरंगों की भाँति ध्वनि भी उपयुक्त धरातलों से परावर्तित हो जाती है। परन्तु जो तल ध्वनि के लिये परावर्त्तक (Reflector) का कार्य करता है यह आवश्यक नहीं है कि प्रकाश-तरंगे भी उससे परावर्त्तित हो सकें। जिस तल में तरंग विशेष के तरंग दैर्घ्य (wave length) के लगभग आकार की असमानता या खुरदरापन (unevenness) न हो उस तरंग को परावर्तित कर सकता है। ध्वनि तरंगों का तरंग दैर्घ्य (12 गज से ·5 इंच तक) प्रकाश के तरंग दैर्घ्य (·00005 सें० मी० के लगभग) की अपेक्षा बहुत अधिक होता है। अतः जो दीवार ध्वनि को बहुत अच्छी तरह परावर्त्तित कर देती है प्रकाश-तरंगों को नहीं कर सकती। परन्तु इसका उल्टा सत्य नहीं है। एक प्रकाशीय दर्पण (optical mirror) भली प्रकार से ध्वनि दर्पण का कार्य कर सकता है।

समतल से परावर्त्तन—चित्र में AB एक लकड़ी का समतल तख्ता है। इसके अभिलम्ब रखा हुआ N गत्ते का पर्दा है जिस पर मोटा कपड़ा भिगो कर चढ़ा दिया गया है। नली S को किसी स्थिति में रखकर उसके मुँह पर घड़ी रख दीजिये। नली R के मुँह पर लगी हुई रबर की नली को कान में लगाये हुई उसकी (R) स्थिति को ऐसा समायोजित कीजिये कि घड़ी की टिकटिक स्पष्ट सुनाई देने लगे। पर्दे के कारण सीधी तो ध्वनि कान तक पहुँच नहीं सकती। R और S की अक्षों को बढ़ाकर तख्ते के तल पर स्थित उनके कटान विन्दु O पर तख्ते का अभिलम्ब (normal) ON खींचिये।

चित्र 11

आप देखेंगे कि—

(i) अक्ष SO, अक्ष RO और अभिलम्ब ON एक ही तल में है।

(ii) आपतित कोण SON=परावर्त्तन कोण RON.

वक्र तल से परावर्त्तन—दो बड़े अभिमुख (aperture) वाले अवतल (concave) दर्पण एक बड़े कमरे की आमने-सामने की दीवारों में ऐसे लगाइये कि दोनों की अक्ष एक ही सरल रेखा में हों। जब एक की नाभि पर घड़ी रखिये और दूसरे की नाभि (focus) के पास एक कीप रखिये जिसके पीछे लगी हुई रबर की नली आपके कान में लगी हो। अब कीप दूसरे दर्पण की नाभि पर होगी तो घड़ी की आवाज़ और दूसरे स्थानों पर हटाने से टिकटिक की ध्वनि मन्द हो जायगी।

चित्र 12

अतः स्पष्ट है कि ध्वनि भी परावर्त्तन के उन्हीं नियमों का पालन करती है जो प्रकाश और ताप की तरंगों के लिय लागू होते हैं।

प्रतिध्वनि (Echo)—परावर्तित ध्वनि ही "प्रतिध्वनि" कहलाती है। किसी ऊँची दीवार की ओर मुँह करके शब्द कीजिये। वही शब्द दीवार की ओर से लौटते हुए प्रतीत होंगे। कुये में मुँह करके बोलिये, प्रतिध्वनि सुनाई देगी।

सुनी हुई ध्वनि का प्रभाव लगभग $1\frac{1}{10}$ से० तक बना रहता है। अतः यदि प्रतिध्वनि 1/10 से० के बाद आती है तो स्पष्ट सुनाई देगी अन्यथा प्रतिध्वनि ध्वनि से ही मिल जायेगी और दोनों में कोई अन्तर नहीं ज्ञात होगा। प्रतिध्वनि के स्पष्ट होने के लिये परावर्त्तक-तल प्रेक्षक से कम से कम इतनी दूर स्थित हो कि ध्वनि के वहाँ तक जाने और वापस आने में 1/10 से० लगें। अर्थात् उसकी दूरी 55 फुट (वेग=1100 फु०/से०) से कम न हो। यदि प्रतिध्वनि 1/10 से० से पहले आती है तो वास्तविक ध्वनि तीव्र चाहे भले ही हो जाय परन्तु अस्पष्ट होगी।

प्रायः देखा गया है कि हम औसत तौर पर प्रति सेकिंड पाँच शब्दांशों का उच्चारण करते हैं। अर्थात् एक अक्षर के बोलने में लगभग 1/5 से० लगता है। अतः प्रतिध्वनि इसी 1/5 से० में आ जानी चाहिये वरना यह इसके बाद बोले जाने वाले अक्षरों की ध्वनि से मिलकर गड़बड़ पैदा करेगी। उदाहरण के लिये मान लीजिये मैं एक सेकिंड में [**अब मत आ**] पाँच अक्षरों का उच्चारण करता हूँ। यदि परावर्तक मुझ से 110 फुट से कम दूर है तब तो 'अ' की प्रतिध्वनि 'ब' उच्चारण करने से पहले ही आ जायेगी और 'ब' की प्रतिध्वनि 'म' के उच्चारण से पहले। सुनने वालों को मेरी बात स्पष्ट सुनाई देगी। परन्तु यदि 'अ' की प्रतिध्वनि 'ब' के समय और 'ब' की प्रतिध्वनि 'म' के समय आती है तो 'अ' के अतिरिक्त सब अक्षर अस्पष्ट हो जायेंगे। और प्रतिध्वनि भी स्पष्ट

न होगी। अतः एकाक्षरी प्रतिध्वनि (mono-syllabic echo) के लिये समयान्तर 1/5 से० होना चाहिये।

4.2. **भवन ध्वनिकी (Acoustics of Buildings)**—प्रतिध्वनि के लौटने के समयान्तर के अतिरिक्त किसी व्याख्यान भवन में भाषण को स्पष्ट सुनने के लिये एक बात और महत्त्वपूर्ण है कि ध्वनि कितने समय तक गूँजती रहती है। अमेरिका के प्रोफसर सबाइन (Sabine) ने प्रयोगों द्वारा निश्चित किया कि प्रतिध्वनि के गूँजने का समय (time of reverberation) भाषण के लिये 1 से० और संगीत के लिये 2·5 से० से अधिक न हो। इसी प्रसंग में उन्होंने खोज की कि प्रतिध्वनि की गूँज का समय,

(i) भवन के आयतन के साथ बढ़ता है।

(ii) परावर्तक तलों के क्षेत्रफल के समानुपाती है।

(iii) परावर्तक तलों के औसत अवशोषण गुणांक के व्युत्क्रमानुपाती है।

किसी तल पर आपतित ध्वनि शक्ति का अवशोषित अंश (fraction) तल के अवशोषण गुणांक के बराबर होता है। खुली खिड़की के लिये इसका मान 1 है अर्थात् आपतित शक्ति का कोई भाग परावर्तित नहीं होता। चिकनी दीवार के लिये अवशोषण गुणांक ·01 है, ग़लीचे के लिये 0·5 और खूब कपड़े पहने हुए व्यक्ति के लिये 0·48 है।

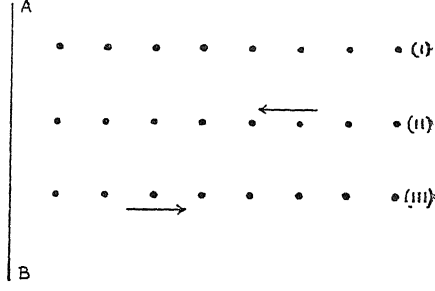
अतः जिस हाल में गूंज का समय अधिक हो तो उसमें खिड़कियों की संख्या बढ़ा देनी चाहिये और दीवारों पर टाट व मोटे कपड़े के पर्दे डाल देने चाहिये। यही कारण है कि रेडियो ब्राडकास्टिंग स्टूडियो की दीवारों व छतों पर एस्बेस्टोस की तह चढ़ी रहती है। फ़र्श पर ग़लीचा बिछा रहता है।

कभी-कभी हाल में श्रोताओं की संख्या कम होने से भी गूँज बढ़ जाती है और भाषण सुनने में कठिनाई होती है।

व्याख्यान भवन में कहीं भी गोलाकार मोड़ न हों वरना ध्वनि कुछ विन्दुओं (स्थानों) पर केन्द्रीभूत होने को प्रवृत्त होगी।

4.3. **परावर्तित ध्वनि तरंग की प्रकृति (Nature)**—ध्वनि तरंगों के परावर्त्तन में दो अवस्थाएँ उल्लेखनीय हैं। एक तो किसी सुदृढ़ धरातल वा दीवार से परावर्त्तन और दूसरी वह अवस्था जब ध्वनि सघन माध्यम से चलकर ऐसे तल से परावर्तित होती है जिससे आगे एक दूसरा और विरल माध्यम है।

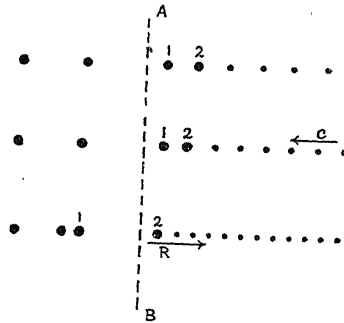
सुदृढ़ दीवार से परावर्त्तन:—चित्र 13 में *AB* एक सुदृढ़ दीवार है। (i) पंक्ति में माध्यम के 8 कण अनुद्वेलित अवस्था में हैं। (ii) पंक्ति में संपीडन की तरंग दायें से बायें बढ़ रही है। प्रत्येक कण अपने दाईं ओर वाले कण से लेकर बाईं ओर के पड़ोसी को उद्वेलन देकर अपनी मध्य स्थिति में आ जाते हैं। अब संपीडन अन्तिम कण पर आ गया है जो दीवार के निकट स्पर्श में है। यह कण दीवार के कारण बाईं ओर तो

विस्थापित हो नहीं सकता। परन्तु प्रत्यास्थता के कारण पहले और दूसरे कण के बीच उत्पन्न हुआ दबाव भी अवश्य हटना है। इसका केवल एक ही मार्ग है। जैसा कि (iii) पंक्ति में प्रदर्शित है, कण दीवार से परावर्तित होकर अपने दाईं ओर के पड़ोसी को धक्का देता है। और यह धक्का भी परावर्तित संपीडन-तरंग के रूप में लौट जाता है, परन्तु अन्तिम कण यदि दीवार से बिल्कुल सटा है तो वह बिल्कुल गतिहीन रहेगा, क्योंकि आपतित तरंग के प्रभाव को परावर्तित तरंग नष्ट कर देती है।

चित्र 13

एक बात स्पष्ट है कि पदार्थ के कण आपतित संपीडन के कारण दायें से बाईं ओर गति कर रहे थे और अब परावर्तित संपीडन के कारण बायें से दायें गति करेंगे। अर्थात् कणों की गति की दिशा (चिन्ह) बदल गयी।

इसी प्रकार विरलन (Rarefaction) की तरंग के लिये भी दिखाया जा सकता है कि परावर्तित तरंग भी एक विरलन होगा परन्तु कणों की गति की दिशा (चिह्न) बदल जायेगी।

अतः सुदृढ़ दीवार से परावर्त्तन के पश्चात् तरंग (संपीडन का विरलन) का रुप या अवस्था नहीं बदलती परन्तु कणों की गति की दिशा (चिह्न) उलट जाती है।

हट सकने वाले (yielding) तल पर परावर्त्तन--(चित्र 14) AB तल के दाईं ओर एक सघन माध्यम है और बाईं ओर विरल। पहली पंक्ति में दोनों माध्यमों की अनुद्वेलित अवस्था दिखाई गई है। दूसरी पंक्ति में "संपीडन" (condensation) तरंग दायें से बायें चलते चलते कण 1 पर आ गई है। कण 2 से 1 को दाईं ओर से धक्का दिया है। सघन माध्यम में चलकर जब संपीडन कण 2 तक आया था तो प्रत्येक कण का आयाम, कहिये a था। अर्थात् उद्वेलन के कारण जब कण बाईं ओर विस्थापित होते थे तो आगे वाले कणों द्वारा उत्पन्न किया हुआ विरोध a दूर हटने पर ही इतना अधिक हो जाता था कि कण को अपनी मध्य स्थिति में लौटना पड़ता था।

चित्र 14

परन्तु कण 1 के बाईं ओर विरल माध्यम है अब उसकी गति को रोकने वाला विरोध अपेक्षाकृत कम होगा और वह अपनी मध्य स्थिति से b दूर तक आकर स्थिर होता है। स्पष्टतया a की अपेक्षा b बड़ा होगा और अब कण 1 और 2 के बीच सामान्य अवस्था से अधिक फासला हो जायेगा। इस समय इसी स्थान पर विरलन (Rarefaction) की उत्पत्ति हो गई है। कण 1 और 2 के बीच उत्पन्न हुए नीचे दबाव के कारण कण 2 और बाईं ओर चलेगा। इसके बाद कण 3 और इस प्रकार विरलन की तरंग दाईं ओर बढ़ती जायेगी। यह अवस्था चित्र की तीसरी पंक्ति में प्रदर्शित है।

इसी प्रकार "विरलन" तरंग को लेकर दिखा सकते हैं कि परावर्तित तरंग "संपीडन" तरंग होगी और माध्यम के कण दोनों तरंगों के प्रसरण के लिये एक ही दिशा में गति करेंगे।

इस अवस्था में परिवर्तन के कारण तरंग का रूप (संपीडन का विरलन आदि) बदल जाता है परन्तु कणों की गति की दिशा (चिह्न) नहीं बदलती।

4.4. **ध्वनि-वर्त्तन (Refraction of Sound)**—ध्वनि एक माध्यम से चलकर अब दूसरे माध्यम में प्रवेश करती है तो उसकी कुछ शक्ति तो परावर्तित होकर प्रथम माध्यम ही में लौट आती है। परन्तु कुछ अंश दूसरे माध्यम में वर्तित-तरंग (Refracted wave) के रूप में आगे बढ़ता है। यह क्रिया वर्त्तन के साधारण नियमों के अनुसार ही होती है।

पतली रबर का ताल के आकार का एक थैला लेकर उसमें कार्बन डाइआक्साइड गैस भर दीजिये। उसके एक ओर घड़ी रखिये और दूसरे ओर एक कीप की सहायता से जिसमें लगी रबर की नली आपके कान में लगी है, ऐसा स्थान ज्ञात कीजिये जहाँ पर घड़ी की टिकटिक स्पष्ट सुनाई दे। यह घड़ी का ध्वनि-बिम्ब (Sonic-image) है। लैंस से उत्पादक (घड़ी) और बिम्ब की दूरी u, v, नापकर लैंस का साम्यान्तर

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{v}-\frac{1}{u}$$ सूत्र से निकाल सकते हैं।

4.5. **ध्वनि-वर्त्तन के प्रभाव**—गर्मियों में दिन के समय पृथ्वी के निकटस्थ वायु की तह का ताप अधिक होता है और जैसे-जैसे ऊपर जाते हैं ताप कम होता जाता है। इससे ध्वनि तरंग के मुख पृष्ठ (wave front) का नीचे वाला भाग ऊपर वाले भाग की अपेक्षा अधिक तेज़ी के साथ चलेगा (वेग पर ताप का प्रभाव)। अतः आगे बढ़ने पर ध्वनि गमन की दिशा (तरंग मुख पृष्ठ के अभिलम्ब की दिशा) ऊपर की ओर मुड़ती जायेगी और कुछ दूर आगे चलकर उसकी दिशा ऐसी हो जायगी कि खड़े हुए मनुष्यों के सिर के ऊपर से निकल जायेगी वे उसे नहीं सुन सकेंगे।

इसके विपरीत रात्रि के समय पृथ्वी के सम्पर्क में रहने वाली वायु शीघ्र ठंडी हो जाती है परन्तु ऊपर की तहों का ताप ऊँचा रहता है। अतः ऊपर के भाग, तरंग मुख

पृष्ठ के नीचे भागों की अपेक्षा तेज़ चलते हैं और ध्वनि गमन की दिशा नीचे की ओर मुड़ती जाती है। इससे रात्रि के समय दूर की ध्वनि भी स्पष्ट सुनी जा सकती है।

वायु-वेग के कारण वर्त्तन—वायु का वेग पृथ्वी के पास कम होता है परन्तु जैसे जैसे ऊपर जाते हैं वेग बढ़ता जाता है। इसका कारण यह है कि पृथ्वी के पास पेड़, मकान आदि से टकराकर वायु-वेग कम हो जाता है।

अत: यदि वायु ध्वनि के विरुद्ध बह रही है तो ध्वनि-तरंग के मुख पृष्ठ के ऊपरी भाग का वेग नीचे भागों की अपेक्षा कम हो जायेगा। आगे बढ़ने पर ध्वनि गमन की दिशा ऊपर की ओर मुड़ती जायेगी।

इसके विरुद्ध यदि वायु उसी दिशा में चले जिसमें ध्वनि जा रही है तो उसके गमन की दिशा नीचे मुड़ती जायेगी।

अत: वायु की दिशा में ध्वनि दूर तक सुनाई दे सकती है परन्तु वायु-वेग के विरुद्ध थोड़ी ही दूर पर ध्वनि अस्पष्ट हो जायेगी।

4.6. **ध्वनि का व्यतिकरण (Interference)**—इस घटना के अनुसार दो ध्वनियाँ मिलकर "पूर्ण शान्ति" भी उत्पन्न कर सकती हैं। प्रथम दृष्टिपात् पर यह बात बड़ी आश्चर्य जनक प्रतीत होती है कि (ध्वनि+ध्वनि)=पूर्ण शान्ति। परन्तु वास्तव में यह घटना तरंग-प्रकृति का ही लाक्षणिक गुण है।

जब कोई ध्वनि-तरंग माध्यम में चलती है तो माध्यम के किसी स्थान पर ध्वनि की उद्घोषिता उस स्थान विशेष पर स्थित कण के आयाम के वर्ग की समानुपाती होती है। परन्तु यदि उसी क्षण उसी कण पर एक दूसरी तरंग आकार विस्थापन उत्पन्न करे तो कण का परिणामित विस्थापन पहली और दूसरी तरंगों द्वारा उत्पन्न किये हुए विस्थापनों का दिष्ट-योग (vector sum) होगा। यह योग समानान्तर चतुर्भुज के नियमानुसार ज्ञात किया जायेगा।

स्पष्टतया ऐसी अवस्था बिल्कुल संभव है कि दोनों तरंगों के विस्थापन परस्पर बराबर परन्तु विपरीत हों। तो परिणामित विस्थापन शून्य होगा और ध्वनि की उद्घोषित भी शून्य। इस घटना को **विनाशकारी व्यतिकरण** (Destructive Interference) कहते हैं।

परन्तु उतना ही सम्भव यह है कि दोनों तरंगों के विस्थापन एक ही दिशा में हों। तब तो परिणामित विस्थापन दूना और ध्वनि की उद्घोषिता चौगुनी होगी।

विनाशकारी व्यतिकरण के लिये आवश्यक शर्तें:—किसी स्थान पर लगातार विनाशकारी व्यतिकरण के प्रेक्षण के लियें यह आवश्यक है कि—

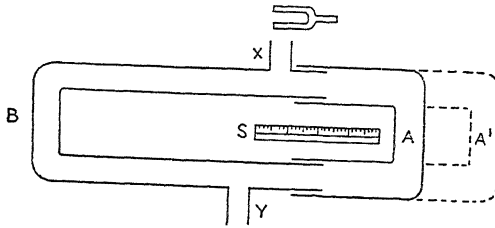
(1) दोनों ध्वनि तरंगों की आवृत्ति (अथवा तरंग दैर्ध्य) समान हों। वरना किसी भी कण पर दोनों का कलान्तर (phase difference) लगातार बदलता रहेगा। किसी क्षण यदि वे विपरीत कला में हैं और एक दूसरे के प्रभाव को नष्ट करती हैं तो दूसरे क्षण एक ही कला में आकर उद्घोषित ध्वनि उत्पन्न करेंगी।

(2) दोनों तरंगों के स्रोतों का कलान्तर समय के साथ स्थिर रहना चाहिये वरना किसी कण पर पहुँचकर तरंगों का कलान्तर भी बदलता रहेगा।

(3) दोनों तरंगों के आयाम बराबर हों वरना दोनों के विस्थापन विपरीत होने पर भी परिणामित विस्थापन शून्य न होगा और पूर्ण शान्ति उत्पन्न न होगी।

(4) दोनों तरंगों द्वारा कणों में उत्पन्न किये हुए विस्थापन एक ही सरल रेखा में हों अन्यथा दोनों का दिष्ट योग (vector sum) शून्य न होगा।

व्यतिकरण का प्रदर्शन (क्विंके की नलिका द्वारा)--व्यवहार में व्यतिकरण की सब शर्तों को पूरा करने वाली परन्तु दो भिन्न स्रोतों से उत्पन्न तरंगों का प्राप्त करना प्राय: असम्भव है। अत: एक ही स्रोत से उत्पन्न होने वाली ध्वनि को दो भागों में बांटा जाता है। इन दो भागों को अलग-अलग मार्गों से ले जाकर एक दूसरे स्थान पर अधिस्थापित (Superposed) कराया जाता है। एक मार्ग की लम्बाई घटा-बढ़ाकर दोनों के कलान्तर को नियन्त्रित किया जाता है।

चित्र में क्विंके की नली दिखाई गई है। यह A और B दो नलियों से मिलकर बनी है। B कुछ चौड़ी है और A पर खिसक सकती है। खिसकाई हुई दूरी S पैमाने पर पढ़ी जा सकती है। ध्वनि स्रोत (यहाँ स्वरित्र) X द्वार के सामने रखा जाता है। B नली में जाकर स्रोत से निकली हुई ध्वनि दो भागों में बंट जाती है। एक भाग XBY मार्ग से और दूसरा XAY मार्ग से जाकर Y पर अधिस्थापित होता है। परिणामित ध्वनि को सुनने के लिये Y द्वार के आगे एक कीप रखिये जिसके पीछे जुड़ी हुई रबर की नली प्रेक्षक के कान पर लगी हो।

चित्र 15

जब मार्ग $XBY = XAY$ तो दोनों भागों में कलान्तर शून्य होगा। दोनों एक दूसरे के प्रभाव में योग देंगे और परिणामित ध्वनि की उद्घोषिता पर्याप्त होगी। अब A को आगे इतना खिसकाया कि मार्ग $XAY - XBY = \lambda/2$। तो दोनों ध्वनि-तरंगों में $\lambda/2$ या π का कलान्तर होगा। एक का संपीडन दूसरी के विरलन के समय Y पर पहुँचेगा। अत: परिणामित ध्वनि बहुत मन्द होगी यहाँ तक कि वह सुनाई भी न दे।

इसके बाद जैसे-जैसे A को आगे खिसकाते जायेंगे तो बारी-बारी से तीव्र और मन्द ध्वनि होती रहेगी। जब भी दोनों मार्गों में $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{2} \ldots (2n+1)\lambda/2$ का अन्तर

होगा ध्वनि मन्द होगी और जब λ, $2\lambda \ldots n\lambda$ होगा तो तीव्र ध्वनि सुनाई देगी क्योंकि दूसरी अवस्था में दोनों के संपीडन और विरलन एक साथ Y पर पहुँचेंगे।

एक शान्ति की स्थिति से दूसरी शान्ति की स्थिति प्राप्त करने के लिये A को $\lambda/2$ के बराबर खिसकाना पड़ता है। इस प्रकार A की स्थिति S पैमाने पर पढ़कर तरंग दैर्घ्य ज्ञात हो सकता है।

4.7. **संकर ध्वनि (Beats)** :—जब कभी दो लगभग बराबर आवृत्ति वाली ध्वनियाँ एक साथ उत्पन्न की जाती हैं तो उनकी सम्मिलित (संयुक्त) ध्वनि की उद्घोषिता एक निश्चित आवृत्ति के साथ बढ़ती और घटती है। ध्वनि की उद्घोषिता में होने वाले आवर्त्त चढ़ाव उतार (Waxing and waning) की घटना को संकर ध्वनि कहते हैं। एक चढ़ाव और एक उतार मिलकर एक संकर ध्वनि (beat) बनाते हैं। एक सेकिंड में जितनी संकर ध्वनि उत्पन्न होती है उनकी संख्या संकर ध्वनि की आवृत्ति (frequency) कहलाती है। यह आवृत्ति संकर ध्वनि उत्पन्न करने वाली ध्वनियों की व्यक्तिगत आवृत्तियों के अन्तर के बराबर होती है।

संकर ध्वनि की गणितीय विवेचना—मान लीजिये दो उत्पादक क्रमशः m और n आवृत्ति की ध्वनि तरंगे उत्पन्न कर रहे हैं जिनका आयाम a है। इनके कारण माध्यम के किसी कण के $t=t$ से० समय पर विस्थापन क्रमशः—

$$y_1 = a \sin 2\pi mt$$

और $y_2 = a \sin 2\pi nt$ होंगे।

अतः कण का परिणामित विस्थान y_1 और y_2 का बीजीय योग Y होगा।

$$y = y_1 + y_2$$

$$= a \sin 2\pi mt + a \sin 2\pi nt$$

$$= 2a \sin 2\pi\left(\frac{m+n}{2}\right)t.\ \cos 2\pi \left(\frac{m-n}{2}\right) t.$$

$$= A \sin 2\pi \left(\frac{m+n}{2}\right) t.$$

यहाँ $A = 2a \cos 2\pi \left(\frac{m-n}{2}\right) t$ है।

स्पष्ट है कि कण के परिणामित कम्पन की आवृत्ति $\frac{m+n}{2}$ और आयाम A होगा। परन्तु A भी समय के साथ बदलता जायेगा। क्योंकि जब,

$$t = 0 \qquad A = 2a \cos 0 = 2a$$

$$t = \frac{1}{2(m-n)} \text{ से० } A = 2a \cos 2\pi \frac{m-n}{2} \times \frac{1}{2(m-n)}$$

$$=2a \quad \cos \frac{\pi}{2}=0.$$

$$t=\frac{1}{(m-n)} \text{ से० } A=2a \cos 2\pi\frac{m-n}{2} \frac{1}{(m-n)}$$

$$=2a \cos \pi=-2a$$

$$t=\frac{3}{2(m-n)} \text{ से० } A=2a \cos 2\pi.\frac{m-n}{2} \cdot \frac{3}{2(m-n)}$$

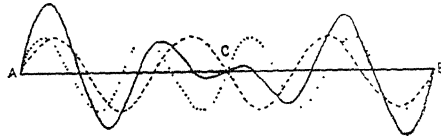
$$=2a \cos\frac{3\pi}{2}=0.$$

इस प्रकार हम देखते हैं कि $\frac{1}{m-n}$ से० के अन्तर पर आयाम शून्य हो जाता है। और इतने ही समय के अन्तर पर धनात्मक अथवा ऋणात्मक दिशा में महत्तम ($\pm 2a$) हो जाता है। अर्थात् $\frac{1}{m-n}$ से० के अन्तर पर परिणामित ध्वनि की उद्घोषिता ($4a^2$ के समानुपाती) व्यक्तिगत तरंगों से उत्पन्न की हुई उद्घोषिता की चार गुनी हो जाती है। तथा दो महत्तम उद्घोषिताओं के ठीक मध्य में उद्घोषिता का मान शून्य हो जाता है। इस प्रकार $\frac{1}{m-n}$ से० में परिणामित उद्घोषिता में एक चढ़ाव (waxing) और एक उतार (waning) हो जाता है। अतः संकर ध्वनि की आवृत्ति ($m-n$) दोनों आवृत्तियों के अन्तर के बराबर हुई। एक सैकिंड में ($m-n$) संकर ध्वनियाँ सुनाई देंगी।

संकर-ध्वनि की लेखा चित्र से विवेचना—मान लीजिये दो स्वरित्र क्रम से 40 और 30 आवृत्ति की ध्वनि तरंगें वायु में उत्पन्न कर रहे हैं। तो किसी भी कण के लिये "समय-विस्थापन" सम्बन्ध क्रम से,

$$y_1=a \sin 2\pi.\,40\, t=a \sin 80\pi t$$

और $$y_2=a \sin 2\pi.\,30t=a \sin 60\pi t$$

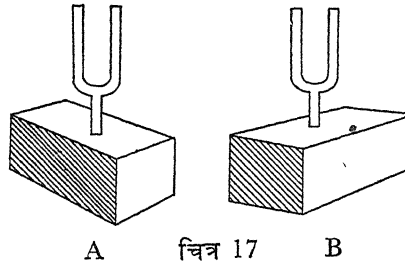
समीकरणों द्वारा व्यक्त होगा। $\frac{1}{10}$ से० में प्रथम स्वरित्र 4 और दूसरा 3 कम्पन पूरा कर लेगा। चित्र में दूरी $AB=\frac{1}{10}$ से० बनाई गई है। पूर्ण रेखा से

चित्र 16

पहले और बिन्दु रेखा से दूसरे स्वरित्र का 'समय-विस्थापन' वक्र दिखाया गया है। A और B पर दोनों वक्र समान कला में है और C पर दोनों का कलान्तर π है। अतः

$t=0$ (A बिन्दु) और $t=\frac{1}{10}$ से० (B बिन्दु) पर कण का परिणामित विस्थापन व्यक्तिगत तरंगों से उत्पन्न विस्थापनों का योग होगा। ध्वनि की उद्घोषिता महत्तम होगी। परन्तु इन दोनों क्षणों के ठीक बीच में $t=\frac{1}{20}$ से० (विन्दु C) पर विस्थापन दोनों विस्थापनों के अन्तर के बराबर होगा। उद्घोषिता निम्नतम होगी।

इस प्रकार हमने देखा कि समय में पास-पास वाली निम्नतम और उच्चतम उद्-घोषिताओं के क्षण $\frac{1}{20}$ से० के अन्तर से उत्पन्न होते हैं। इसलिये $\frac{1}{10}$ से० में ध्वनि में एक चढ़ाव और एक उतार हो जाता है। अर्थात् $\frac{1}{10}$ से० में एक संकर ध्वनि (beat) पैदा होती है। अतः एक से० में 10 संकर ध्वनियाँ उत्पन्न होंगी। आप देख सकते हैं कि $10=40-30=$आवृत्तियों का अन्तर। इस प्रकार यदि स्वरित्रों की आवृत्तियाँ m और n होतीं तो संकर ध्वनि की आवृत्ति $(m-n)$ होती।

संकर-ध्वनि की उत्पत्ति का प्रदर्शन—चित्र की भाँति दो समान आवृत्ति (कहिये 256) के स्वरित्र A और B ऐसे लीजिये जो अपने-अपने अनुनाद बक्सों (Resonance Boxes) पर लगे हों। दोनों बक्सों के मुँह आमने-सामने करके मेज पर रख दीजिये।

चित्र 17

अब रबर की हथौड़ी से A को बजाइये। थोड़ी देर बाद हाथ से छू कर A को बन्द कर दीजिये। ध्वनि फिर भी आती रहेगी। B को भी छुइये। ध्वनि बन्द हो जाती है। सिद्ध हुआ कि A के बजाने से B भी बजने लगा। इस घटना को **अनुनाद** (Resonance) कहते हैं। एक ही स्वतंत्र आवृत्ति की दो वस्तुयें यदि पास-पास रखी हों, तो एक के कम्पन करने से दूसरी में भी कम्पन प्रेरित (induced) हो जाते हैं।

अब अकेले B को बजाइये। वैसी ही ध्वनि आयेगी। A और B दोनों को एक साथ बजाइये। कोई अन्तर नहीं होगा। वैसी ही लगातार ध्वनि प्राप्त होगी।

अब A की भुजाओं पर थोड़ा मोम लगा दीजिये। इससे स्वरित्र की आवृत्ति 256 से कम हो जायेगी। A को बजाइये, लगातार ध्वनि निकलेगी। B से भी लगातार ध्वनि। परन्तु अब यदि A और B दोनों को एक साथ बजायें तो आपको एक आश्चर्यजनक अनुभूति होगी। दोनों की संयुक्त ध्वनि की उद्घोषित बारी-बारी से ऊँची और नीची होती हुई प्रतीत होगी। इसी घटना को संकर ध्वनि कहते हैं।

इसी प्रकार हारमोनियम में मोटी ध्वनि उत्पन्न करनेवाली पास-पास की रीडों (Reeds) को अलग-अलग बजाने से लगातार ध्वनि निकलती है। परन्तु दोनों को एक साथ बजाने से संकर ध्वनि की उत्पत्ति स्पष्ट सुनाई देगी।

गायक लोग दो संगीत वाद्यों (musical instruments) को मिलाने में संकर ध्वनि का प्रयोग करते हैं। जब संकर ध्वनि की आवृत्ति घटते-घटते शून्य हो जाती है, तो दोनों वाद्य मिले समझे जाते हैं।

अज्ञात आवृति निकालने में संकर ध्वनि का उपयोग—अज्ञात आवृत्ति के स्वरित्र को ज्ञात आवृत्ति के स्वरित्र के साथ बजा कर उत्पन्न हुई संकर ध्वनियों को गिन लेते हैं। फिर दोनों में से एक स्वरित्र की भुजाओं पर थोड़ा मोम लगा देते हैं जिससे उसकी आवृत्ति कम हो जाती है और फिर दोनों स्वरित्रों को साथ वजाते हैं, तो संकर ध्वनि की आवृत्ति वदल जाती है। इस ज्ञान से अज्ञात आवृत्ति की गणना हो जाती है। इसको एक उदाहरण से समझायेंगे—

उदाहरण 1—एक अज्ञात स्वरित्र को 512 आवृत्ति के स्वरित्र के साथ बजाने से 4 संकर ध्वनियाँ प्रति से० उत्पन्न होती हैं। अब अज्ञात स्वरित्र की भुजाओं में थोड़ा मोम लगा कर 512 आवृत्ति के स्वरित्र के साथ वजाने से केवल 2 संकर ध्वनि प्रति से० होती हैं। अज्ञात आवृत्ति की गणना कीजिये।

मान लीजिये कि अज्ञात आवृत्ति n है।

$\therefore$ संकर ध्वनि की संख्या 4=512 और n का अन्तर

अथवा, $n = 512 \pm 4$

$= 516$ अथवा 508

n पर मोम लगाने से स्पष्टतया आवृत्ति n से कम होगी।

अत: यदि $n = 508$ है, तो 512 और नवीन आवृत्ति में अन्तर 4 से अधिक होगा और संकर ध्वनि की संख्या वढ़ेगी। परन्तु इस प्रश्न में मोम लगाने के बाद संकर ध्वनि 4 से 2 हो गई। तो निश्चित ही अज्ञात आवृत्ति 516 है। मोम लगाने के बाद उसकी आवृत्ति 514 या 510 हो गई थी। इसीलिये संकर ध्वनि केवल 2 रही।

उदाहरण 2—512 आवृत्ति के स्वरित्र के साथ अज्ञात स्वरित्र को बजाने से 4 संकर ध्वनि प्रति से० उत्पन्न होती हैं। अब की बार अज्ञात स्वरित्र की भुजाओं को थोड़ा-थोड़ा रेत से रगड़ कर छोटा कर दिया गया और फिर दोनों को साथ बजाने से केवल दो संकर ध्वनि प्रति से० उत्पन्न हुईं। अज्ञात आवृत्ति क्या है?

स्वरित्र की आवृत्ति उसकी भुजा की लम्बाई घटाने से बढ़ती है और भुजाओं पर मोम लगाने से घटती है। अत: यदि अज्ञात आवृत्ति n थी, तो रगड़ने के बाद उसकी आवृत्ति n' होगी, जो n से बड़ी है।

अब पहली बार बजाने से संकर ध्वनि की संख्या,

$$n \sim 512 = 4$$

$$\therefore n = 512 \pm 4$$

$= 516$ अथवा, 508

दूसरी बार संकर ध्वनि की संख्या,

$$n' \sim 512 = 2$$

$$\therefore n' = 514 \text{ अथवा, } 510$$

परन्तु हम जानते हैं कि रगड़ने से आवृत्ति बढ़ती है। तो n' अवश्य ही n से बड़ा है। ऐसा तभी हो सकता है जब कि n का मान 508 हो और रगड़ने के बाद वह 510 वा 514 हो गया हो।

अतः अज्ञात आवृत्ति=508

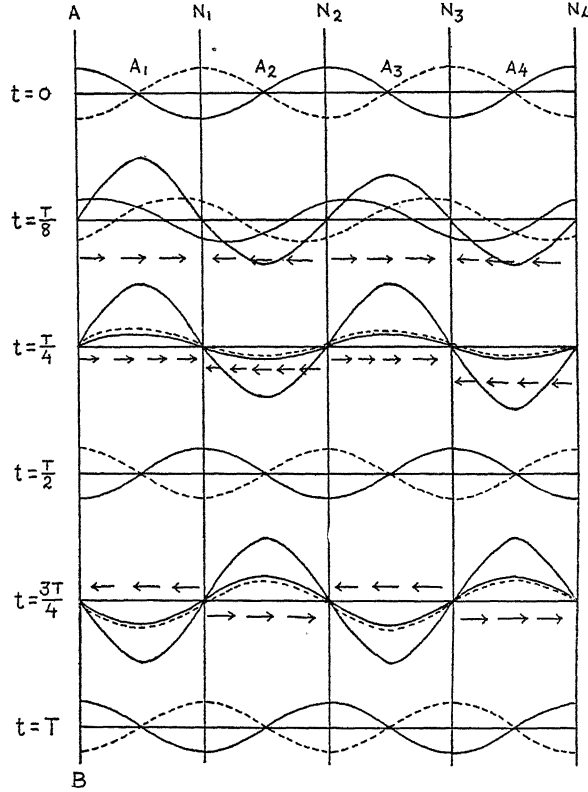
4.8. **अप्रगामी तरंगें (Stationary waves)**:—जब सब प्रकार से समान (identical) दो तरंगें माध्यम में एक साथ एक ही सरल रेखा में परन्तु विपरीत दिशाओं में चल कर अधिस्थापित हों, तो माध्यम के परिणामित उद्वेलन की दशा अप्रगामी तरंग (Stationary wave) कहलाती है। प्रगामी (Progressive) तरंगें यदि अनुदैर्घ्य (Longitudinal) हैं, तो उत्पन्न हुई अप्रगामी तरंग भी अनुदैर्घ्य होगी। और यदि वे अनुप्रस्थ हैं, तो अप्रगामी तरंग भी अनुप्रस्थ होगी। अप्रगामी तरंग में तरंगीय मुख्य लक्षण जैसे संपीडन (शृंग) अथवा विरलन (गर्त्त) अपने स्थान से किसी भी दिशा में गतिमान (move) नहीं होते। वरन्, एक ही स्थान पर संपीडन के बाद विरलन और विरलन के बाद संपीडन बारी-बारी से उत्पन्न और विलीन होते रहते हैं। इसीसे इनका नाम भी अप्रगामी अथवा स्थावर तरंगें रखा गया है।

अप्रगामी तरंगों की उत्पत्ति की प्रक्रिया समझने के लिये अगले पृष्ठ के चित्र पर ध्यान दीजिये। सर्व प्रकारेण समान तरंगें उत्पन्न करने के लिये परावर्तन का सहारा लिया गया है। AB एक सुदृढ़ दीवार है जिस पर दाईं ओर से आ कर T आवर्त्त काल की एक ध्वनि तरंग (बिन्दुमय वक्र) आपतित होती है। परावर्तन के पश्चात् एक अनुरूप तरंग (लगातार वक्र) दाईं ओर को लौट जाती है। दोनों के अधिस्थापन के बाद माध्यम की दशा मोटे लगातार वक्र से दिखाई गई है। प्रथानुसार ही कणों का धनात्मक (मध्य स्थिति से दाईं ओर) विस्थापन X–अक्ष के ऊपर और ऋणात्मक विस्थापन X–अक्ष के नीचे दिखाया गया है।

समय उस क्षण से नापते हैं जब कि दोनों तरंगों में π वा $\lambda/2$ का कलान्तर है। अतः $t=0$ पर माध्यम के समस्त कण अपनी मध्यस्थिति में ही है।

$T/8$ सेकिंड बाद ($t=T/8$) आपतित तरंग बाईं ओर तथा परावर्तित तरंग दाईं ओर $\lambda/8$ आगे बढ़ जाती हैं। तत्क्षणिक माध्यम की अवस्था चित्र की दूसरी पंक्ति से व्यक्त है।

$t=\frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4}$ तथा T की अवस्थाओं का प्रदर्शन करने के लिये चित्र में

दोनों तरंगों को संगत दिशाओं में क्रम से $\frac{\lambda}{4}$, $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{4}$ तथा λ आगे बढ़ा कर

चित्र 18

अधिस्थापित किया गया है। परिणामित मोटा वक्र दोनों वक्रों (लगातार व बिन्दुमय) का बीजीय योग है।

अप्रगामी तरंग की विशेषतायें—जैसा कि चित्र से विदित है $N_1, N_2 \ldots$ आदि ऐसे कण हैं, जो आवर्त्त काल के किसी भी क्षण विस्थापन प्राप्त नहीं करते। सदैव मध्य स्थिति पर ही स्थिर रहते हैं। इनको **निःस्पन्द** (Node) बिन्दु कहते हैं। दो निकटवर्ती निःस्पन्दों के बीच की दूरी $\lambda/2$ है।

इसके विपरीत $A_1, A_2, A_5 \ldots$ आदि ऐसे बिन्दु हैं जिनका आयाम सब कणों में महत्तम है। इनको **प्रस्पन्द** (Antinode) बिन्दु कहते हैं। दो पास-पास के प्रस्पन्द बिन्दु भी $\lambda/2$ की दूरी पर रहते हैं। इस प्रकार दो निःस्पन्दों के ठीक बीच में एक प्रस्पन्द और दो प्रस्पन्दों के बीच एक निःस्पन्द स्थित है।

दो निःस्पन्दों के मध्यवर्ती समस्त कण एक ही दिशा में (दाईं अथवा बाईं ओर) विस्थापित होते हैं। जैसा कि चित्र में तीरों द्वारा प्रदर्शित है $t=T/4$ पर N_2 से N_1 तक के समस्त कण मध्य स्थिति से बाईं ओर चल रहे हैं और N_2 से N_3 तक के समस्त कण दाईं ओर। इस प्रकार N_2 के दोनों ओर के कण उससे दूर भग रहे हैं, अतः वहाँ पर विरलन उत्पन्न हो रहा है। दबाव और घनत्व दोनों का मान गिर गया है। यही दशा $N_4, N_6 \ldots$ आदि की भी है। परन्तु N_3 ऐसा निःस्पन्द है जिसके दोनों ओर के कण उसी की ओर दौड़ रहे हैं। अतः वहाँ पर संपीडन उत्पन्न होगा और माध्यम का दबाव व घनत्व दोनों बढ़ जायेंगे। ठीक यही दशा $N_1, N_5, N_7 \ldots$ आदि पर है। और इन सब कणों की कला समान है। अतः पास-पास के तीन निःस्पन्दों के बीच की दूरी तरंग दैर्घ्य (λ) के बराबर होगी।

$t=3T/4$ पर (इसके $T/2$ से० बाद) N_2 पर संपीडन है और N_3 पर विरलन।

अतः निःस्पन्द ऐसे बिन्दु हैं, जहाँ पर $T/2$ से० के अन्तर से संपीडन और विरलन उत्पन्न व विलीन होते रहते हैं। इस क्षण जहाँ संपीडन $T/2$ बाद वहीं विरलन होगा और फिर उसके $T/2$ बाद पुनः संपीडन।

परन्तु $A_1, A_2 \ldots$ आदि प्रस्पन्द ऐसे बिन्दु हैं जिनके दोनों ओर के कणों का वेग समान है। अतः वहाँ पर दबाव अथवा घनत्व में कोई परिवर्तन नहीं होता।

साधारण तरंगों की भाँति ये तरंगें आगे नहीं बढ़तीं इसीलिये इनका नाम अप्रगामी है।

प्रगामी और अप्रगामी तरंगों की तुलना

प्रगामी तरंग	अप्रगामी तरंग
1. एक निश्चित गति से आगे बढ़ती हैं।	1. एक ही स्थान पर स्थिर रहती हैं।
2. कोई भी कण स्थायी रूप से सदैव मध्य स्थिति पर नहीं रहता। अकस्मात् से यदि कोई कण स्थिर हो जाय, तो तरंग उसी स्थान पर समाप्त हो जाती है और उससे आगे तरंग नहीं चलती।	2. नियत दूरी पर स्थित $N_1, N_2, \ldots$ आदि निःस्पन्द (Node) ऐसे कण हैं जो सदैव शून्य विस्थापन प्राप्त करते हैं।
3. आयाम सब कणों का समान होता है। परन्तु कोई कण किस क्षण कितना विस्थापन प्राप्त करता है उसकी स्रोत से दूरी पर निर्भर है।	3. निःस्पन्द बिन्दु से दोनों ओर आयाम बढ़ता जाता है। और दो निःस्पन्दों के ठीक मध्य में प्रस्पन्द बिन्दु पर के कण का आयाम महत्तम होता है।
4. किसी भी क्षण माध्यम के समस्त कण एक साथ मध्य स्थिति में नहीं आते। और जब भी कोई कण मध्यस्थिति से गुजरता है, तो अन्य कणों के बराबर वेग से गुजरता है।	4. प्रति आवर्त्त काल में दो बार माध्यम के समस्त कण एक साथ मध्यस्थिति से गुजरते हैं। परन्तु विभिन्न वेगों के साथ।

क्रमशः

प्रगामी तरंग	अप्रगामी तरंग
5. संपीडन और विरलन की तरंगें माध्यम के समस्त कणों से होकर गुजरती हैं। अतः सब कणों पर संगत क्षणों पर दबाव व घनत्व में समान परिवर्तन होते हैं।	5. सब कणों पर दबाव और घनत्व का परिवर्तन समान नहीं होता। निःस्पन्द बिन्दुओं पर ये परिवर्तन अधिकतम होते हैं, परन्तु प्रस्पन्द बिन्दुओं पर घनत्व व दबाव में परिवर्तन होता ही नहीं।
6. एक संपीडन और एक विरलन मिलकर एक तरंग दैर्घ्य बनाते हैं।	6. एक निष्पन्द और सबसे नज़दीकी प्रस्पन्द के बीच की दूरी चौथाई तरंग दैर्घ्य ($\lambda/4$) के बराबर होती है।
7. तरंग के लक्षण संपीडन व विरलन अथवा शृंग व गर्त्त निश्चित वेग से आगे बढ़ते हैं।	7. तरंग लक्षण स्थिर एवं नियत स्थानों पर बारी-बारी से उत्पन्न और विलीन होते रहते हैं; अनुदैर्घ्य तरंग के संपीडन व विरलन निःस्पन्दों पर व अनुप्रस्थ तरंग के शृंग व गर्त्त प्रस्पन्दों पर।

सारांश

ध्वनि तरंगें भी प्रकाश की भाँति समान नियमों का पालन करती हुई परावर्तित व वर्तित होती हैं। परावर्तित ध्वनि को प्रतिध्वनि कहते हैं।

व्याख्यान भवनों में खिड़कियों की संख्या बढ़ा कर, दीवारों पर पर्दे डाल कर और फ़र्श पर कालीन बिछा कर प्रतिध्वनि के गूँजते रहने का समय (Period of reverberation) 1 से० से कम कर दिया जाता है।

सुदृढ़ दीवार से परावर्त्तन होने पर तरंग का रूप या अवस्था (संपीडन वा विरलन) नहीं बदलती, परन्तु कणों की गति की दिशा उलट जाती है।

हट सकने वाले तल से परावर्त्तन से संपीडन का विरलन और विरलन का संपीडन हो जाता है, परन्तु कणों की गति दिशा वही रहती है।

जब दो ऐसी ध्वनियाँ एक साथ उत्पन्न की जाती हैं, जिनकी आवृत्ति में थोड़ा ही अन्तर हो, तो परिणामित उद्घोषिता में आवर्त्त चढ़ाव व उतार (Waxing & waning) होता है। इस घटना को संकर ध्वनि (Beat) कहते हैं। एक सेकिंड में संकर ध्वनियों की संख्या उनकी आवृत्ति कहलाती हैं।

विपरीत दिशाओं में चलनेवाली अनुरूप तरंगों के अधिस्थापन से अप्रगामी तरंगें उत्पन्न होती हैं। इनमें कुछ बिन्दु (निःस्पन्द) तो सदैव मध्य स्थिति में ही रहते हैं और उनके बीच वाले बिन्दु (प्रस्पन्द) अधिकतम आयाम से दोलन करते हैं।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. प्रतिध्वनि से आप क्या समझते हैं? भवन ध्वनिकी पर एक टिप्पणी लिखिये।
2. सुदृढ़ दीवार और हट सकनेवाले तल पर ध्वनि तरंगों के परावर्त्तन की प्रक्रिया सुचारु ढंग से समझाइये। ग्राफ़ द्वारा समझाइये।

3. दो समानान्तर पहाड़ियों के बीच खड़े हो कर गोली चलाने पर पहली प्रतिध्वनि 2 से० बाद और दूसरी प्रतिध्वनि 3 से० बाद सुनाई देती है। यदिध्वनि का वेग 1100 फुट/से० हो, तो पहाड़ियों के बीच प्रेक्षक की स्थिति बताइये। तीसरी प्रतिध्वनि कब और क्यों सुनाई देगी ?
4. संकर ध्वनि क्या है और कैसे उत्पन्न होती है ? गणित और ग्राफ द्वारा समझाइये।
5. संकर ध्वनि की आवृत्ति से आप क्या समझते हैं ? इस घटना की सहायता से अज्ञात आवृत्ति कैसे ज्ञात की जाती है ?

   256 आवृत्ति के स्वरित्र के साथ एक अज्ञात स्वरित्र को बजाने से 5 संकर ध्वनि उत्पन्न होती है। अन्तिम स्वरित्र की भुजाओं पर थोड़ा मोम लगा कर फिर बजाने से फिर 5 संकर ध्वनि प्रति सेकिंड उत्पन्न होती है। अज्ञात आवृत्ति की गणना कीजिये।
6. अप्रगामी तरंग क्या है ? उनकी उत्पत्ति की प्रक्रिया ग्राफ से समझाइये। प्रगतिशील तरंगों से इनकी तुलना कीजिये।

अध्याय 5

डोरी के अनुप्रस्थ कम्पन

(Transverse Vibrations of Strings)

5.1. **डोरी (String)**—इस प्रसंग में डोरी का अभिप्राय एक ऐसे इकसार पतले धागे, धातु के तार अथवा ताँत से है जिसमें अनुदैर्घ्य प्रत्यास्थता (longitudinal elasticity) तो हो परन्तु रूप प्रत्यास्थता अथवा सुदृढ़ता (rigidity) न हो। डोरी में कम्पन उत्पन्न करने के लिये उसको लम्बाई की दिशा में तनाव डालकर किसी बिन्दु पर अभिलम्ब दिशा में उँगली से खींचकर (plucked), हलके हथोड़े से चोट देकर (struck) अथवा धन्वा (bow) से रगड़ कर (bowed) प्रेरित किया जाता है। प्रत्येक दशा में अनुप्रस्थ कम्पन उत्पन्न होते हैं।

5.2. **स्वतन्त्र (free), प्रभावित (forced) तथा अनुनाद (resonance) कम्पन :**

स्वतन्त्र कम्पन (Free Vibrations)—धारा 1·4 में गिनाये गये तीनों आवश्यक गुणों को रखने वाली वस्तु कम्पन कर सकती है। ऐसी वस्तु को उसकी मध्य स्थिति से विचलित करके छोड़ देने से उसमें कम्पन होने लगते हैं। कम्पनों का आवर्त्तकाल निश्चित होता है जिसका आंकिक मान वस्तु की संहति, आकार, आकृति और प्रत्यास्थता पर निर्भर है। इन कम्पनों को **स्वतन्त्र कम्पन** और उनके आवर्त्तकाल को वस्तु का **स्वतन्त्र आवर्तकाल** (free period) कहते हैं। स्वतन्त्र कम्पन करते

समय वस्तु किसी भी वाह्य बल से प्रभावित नहीं होती। विभिन्न स्वरित्रों पर लिखी हुई आवृत्ति उनकी स्वतन्त्र आवृति ही होती है।

प्रभावित कम्पन (Forced Vibrations)—किसी वाह्य आवर्त्त बल के आरोपण से उत्पन्न हुए वस्तु के कम्पन प्रभावित कम्पन कहलाते हैं। पहले तो वह अपने स्वतन्त्र आवर्त्त काल से ही कम्पन करने की ज़िद करेगी परन्तु कुछ देर के बाद उसको आरोपित बल के आवर्त्तकाल से ही कम्पन करने को बाध्य होना पड़ेगा। प्रभावित कम्पनों का आयाम स्वतन्त्र कम्पन की अपेक्षा कम रहता है। उत्प्रेरक बल के हटा लेने के थोड़ी ही देर बाद कम्पन समाप्त हो जाते हैं।

स्वरित्र को बजाकर उसकी मूँठ (stem) मेज़ पर रखिये। मेज़ भी स्वरित्र की आवृत्ति के प्रभावित कम्पन करने लगेगी। और क्योंकि मेज़ का तल विस्तृत है अतः उसके सम्पर्क में आने वाली वायु का अपेक्षाकृत अधिक आयतन कम्पन करता है। इससे ध्वनि की उद्घोषिता बढ़ जाती है। परन्तु इस प्रकार ऊर्जा (energy) का व्यय बहुत शीघ्र होता है और जल्दी ही कम्पन समाप्त हो जाते हैं।

अनुनाद कम्पन (Resonance Vibrations)—यदि आरोपित आवर्त्त बल का आवर्त्त काल वस्तु के स्वतन्त्र आवर्त्तकाल के बराबर हो तो वस्तु शीघ्र ही उत्तरोत्तर बढ़ते हुए आयाम के साथ कम्पन प्रारम्भ कर देगी। इस बार आरोपित बल और वस्तु के स्वतन्त्र कम्पन सदैव समान कला में रहेंगे जिससे स्वतन्त्र कम्पनों को बल के प्रत्येक आघात से सहायता मिलेगी। इन कम्पनों को अनुनाद कम्पन कहते हैं।

स्वरित्र को प्रायः ऐसे लकड़ी के खोखले बक्स पर लगाते हैं जिसके अन्दर की वायु का स्वतन्त्र आवर्त्तकाल स्वरित्र के आवर्त्तकाल के बराबर होता है। अत स्वरित्र को वजाने से वायु भी अनुनाद कम्पन करने लगती है और ध्वनि उद्घोषित हो जाती है।

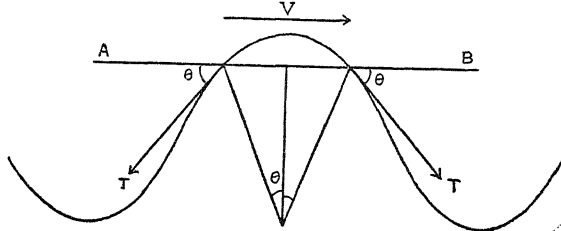
अपने-अपने अनुनाद वक्सों पर चढ़े समान आवृत्ति के दो स्वरित्र पास-पास रखिये। एक को बजाइये और थोड़ी देर बाद हाथ से छूकर बन्द कर दीजिये। दूसरे स्वरित्र से अब भी ध्वनि सुनाई देगी क्योंकि उसमें अनुनाद कम्पन हो रहे हैं।

हेल्महोल्ट्ज़ (Helmholtz) ने विभिन्न स्वतन्त्र आवृत्तियों वाले अनुनादक (resonators) बनाये। उनके पास यदि उसी आवृत्ति की ध्वनि उत्पन्न की जाय तो अनुनाद कम्पन होने लगेंगे।

कहते हैं कि तानसैन वाद्य-संगीत में इतना कुशल था कि वह तबला, सितार, सरंगी आदि को एक ही स्वर में मिलाकर कमरे में बैठकर जब उसी तारत्व (pitch) की ध्वनि गले से निकालता था तो सब वाद्य-यंत्र अनुनाद कम्पनों से बज उठते थे।

5.3. **डोरी में अनुप्रस्थ तरंग का वेग**—माना कि m ग्राम प्रति सें० मी० संहति वाली डोरी में लम्बाई की दिशा में T डाइन का तनाव है। कम्पन करते समय

डोरी में अनुप्रस्थ तरंग V सें० मी० प्रति से० के वेग से दाईं ओर चल रही है। डोरी के AB भाग के तत्क्षणिक संतुलन पर विचार करेंगे।

AB इतना छोटा है कि उसको r सें० मी० त्रिज्या वाले वृत्त का ही एक खंड मान सकते हैं। AB चाप केन्द्र O पर 2θ का कोण बनाता है।

चित्र 19

$$\text{अब कोण} = \frac{\text{चाप}}{\text{त्रिज्या}}$$

$$2\theta = AB/r.$$

$\therefore$ AB की लम्बाई $= 2\theta r$ सें० मी०

और उसकी संहति $= 2\theta r.m$ ग्राम

परिभ्रमण गति के कारण $\overrightarrow{OC}$ दिशा में AB पर कार्य करने वाला अपकेन्द्र बल (Centrifugal force) $= \dfrac{(2\theta rm)V^2}{r}$ डाइन।

डोरी के प्रत्येक बिन्दु पर समान तनाव T लगा हुआ है। उनके क्षैतिज विश्लिष्ट भाग तो परस्पर विनष्ट हो जाते हैं। परन्तु AB की पूरी लम्बाई को धुर नीचे केन्द्र 0 की ओर खींचने वाला बल A और B विन्दुओं पर लगे हुए तनावों (T) के ऊर्द्ध अवयवों का योग होगा।

$\therefore$ $\overrightarrow{CO}$ दिशा में कुल बल $= 2T \sin \theta$

$= 2T\theta$ $\qquad (\theta = \sin \theta$ जब θ छोटा हो)

अत: तत्क्षणिक संन्तुलन के लिये,

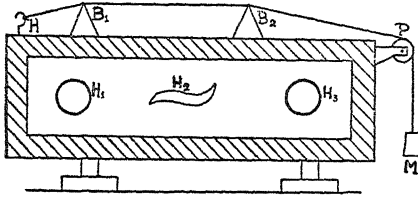
$$\frac{2\theta.r.mV^2}{r} = 2T\theta$$

वा $\qquad V^2 = T/m$

व $\qquad V = \sqrt{T/m}$

अर्थात् अनुप्रस्थ तरंग का वेग डोरी के तनाव (T) और अनुदैर्घ्य घनत्व (linear density) m की निष्पत्ति के वर्गमूल के बराबर होती है।

5.4. **सुरमापी (Sonometer)**—यह एक लकड़ी के खोखले बक्से का बना होता है। इसकी बगल में कुछ छेद (H_1, H_2, H_3) बने होते हैं जिनके द्वारा बक्स के अन्दर की वायु वायुमंडल से सम्बन्धित रहती है। तार को एक सिरे पर H हुक

से बाँध कर सेतु B_1 व B_2 और घिर्री P के ऊपर से गुज़ारते हैं। दूसरे सिरे पर एक भार M ग्राम लटका कर तनाव उत्पन्न करते हैं। सेतु B_1 और B_2 को इधर-उधर चलाकर कम्पन करने वाली डोरी की लम्बाई निश्चित कर देते हैं। बक्स पर दो या तीन तार इसी प्रकार लटकाने का प्रबन्ध होता है।

चित्र 20

मान लीजिये डोरी के एक सें० मी० की संहति m ग्राम, डोरी का तनाव $T(=Mg)$ डाइन और सेतुओं के बीच डोरी की लम्बाई l सें० मी० है। उत्पन्न हुई अनुप्रस्थ तरंग दोनों सेतुओं से बराबर परावर्तित होगी और दो समान परन्तु विपरीत दिशाओं में चलने वाली तरंगों के अधिस्थापन से अप्रगामी तरंग उत्पन्न होगी। सेतु सुदृढ़ दीवार का कार्य करेंगे अतः वहाँ पर निस्पन्द (Node) होंगे और मध्य विन्दु पर प्रस्पन्द (Antinode) होगा। परन्तु दो निस्पन्दों के बीच की दूरी $\lambda/2$ के बराबर होती है जहाँ अधिस्थापित प्रगामी (Progressive) तरंगों का तरंग दैर्घ्य λ है। अतः प्रगामी अनुप्रस्थ तरंगों का तरंग दैर्घ्य $\lambda=2l$ सें० मी०,

यदि तार के कम्पन की आवृत्ति n हो तो तरंग का वेग,

$V = n\lambda = 2nl$ सें० मी०/से० होगा,

परन्तु 5.3 से तरंग का वेग $V = \sqrt{T/m}$

$\therefore \quad 2nl = \sqrt{T/m}$

वा $\quad n = \dfrac{1}{2l}\sqrt{T/m}$

यह समीकरण बहुत ही महत्त्वपूर्ण है। इसकी सहायता से डोरी के अनुप्रस्थ कम्पन के नियम स्पष्ट होते हैं।

5.5. **डोरी के अनुप्रस्थ कम्पन के नियम और उनका सत्यापन (Verification)**—जैसा कि धारा 5.4 के अन्तिम समीकरण,

$$n=\frac{1}{2l}\sqrt{T/m}$$

से स्पष्ट है, यह नियम तीन हैं। इनकी विवेचना निम्न प्रकार है।

1. **लम्बाई का नियम (Law of length)**—

$$\left.\begin{array}{r} n \propto \dfrac{1}{l} \\ \text{या } nl = \text{स्थिरांक} \end{array}\right\} \text{यदि } T \text{ व } m \text{ स्थिर रहें।}$$

अर्थात् एक ही अथवा समान अनुदैर्घ्य घनत्व (m) वाली डोरी में लटके हुए भार को बिना बदले यदि सेतुओं के बीच की दूरी कम की जाय तो निकलने वाली ध्वनि की आवृत्ति बढ़ती जायेगी। इसके विपरीत यदि यह दूरी (l) दूनी कर दी जाय तो आवृत्ति आधी रह जायेगी।

सत्यापन (Verification)—n_1, n_2, n_3, ...स्वरित्रों के संगत सेतुओं के बीच वाली डोरी की वह लम्बाइयाँ ($l_1, l_2, l_3, \ldots$) ज्ञात कीजिये जिसकी स्वतन्त्र आवृत्ति क्रमशः n_1, n_2, n_3, ...के बराबर है। इसके लिये स्वरित्र को बजाकर सुरमापी के अनुनाद बक्स पर रखिये। एक सेतु को स्थिर करके दूसरे को इधर-उधर चलाकर ऐसी स्थिति ज्ञात कीजिये जिस पर सुरमापी के तार में अनुनाद-कम्पन होने लगें। इस स्थिति में तार पर रखा हुआ कागज का हल्का सा टुकड़ा (सवार) हिलकर गिरने लगेगा।

अब स्वरित्र की आवृत्ति और उसके संगत तार की लम्बाई के गुणनफल की गणना सब स्वरित्रों के लिये कीजिये। आप देखेंगे कि n_1l_1, n_2l_2, n_3l_3, ... सब का मान लगभग बराबर है।

Y–अक्ष पर n और X–अक्ष पर $\frac{1}{l}$ लेकर खींचा हुआ ग्राफ एक सरल रेखा होगी जो मूलबिन्दु (origin) से गुज़रती है।

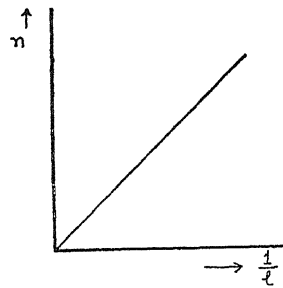
चित्र 21

इसी प्रकार n और l के बीच खींचा हुआ ग्राफ एक आयताकार अतिपरवलय (rectangular hyperbola) होगा।

2. **तनाव का नियम (Law of tension)**–

$n \propto \sqrt{T}$ यदि l और m स्थिर रहे।

अर्थात् यदि एक ही तार के लिये (m स्थिर) सेतुओं के बीच की दूरी स्थिर रखकर (l स्थिर) तार का तनाव बढ़ाया जाय तो कम्पन आवृत्ति भी बढ़ेगी। जब तनाव चौगुना हो जायेगा तो आवृत्ति दूनी हो जायेगी।

सत्यापन (Verification)—सुरमापी पर मुख्य (main) तार के साथ एक सहायक (auxiliary) तार और लटकाइये। मान लीजिये मुख्य और सहायक तार के लिये क्रम से तनाव T_1, T' डाइन और संहति प्रति सें० मी० m, m' है। सहायक तार के सेतुओं के बीच की लम्बाई l_1 सें० मी० के संगत मुख्य तार की उस लम्बाई l' सें० मी० को ज्ञात कीजिये जिस पर दोनों तारों से निकली हुई ध्वनियाँ सुरैक्य (unison) में हों। मान लीजिये इन ध्वनियों की आवृत्ति n_1 है।

सहायक तार का तनाव T और मुख्य तार की लम्बाई l' प्रयोग के अन्त तक स्थिर रहेगी। अब मुख्य तार का तनाव T_2 करके सहायक तार पर संगत लम्बाई l_2 ज्ञात कीजिये जिससे सुरैक्य (unison) हो जाय। इस बार आवृत्ति $\frac{n_1 l_1}{l_2}$ होगी। इसी प्रकार मुख्य, तार को विभिन्न तनाव $T_3, T_4 \ldots$ के लिये उसके l' सें० मी० तार से सुरैक्य उत्पन्न करने वाली सहायक तार की लम्बाइयाँ $l_3, l_4, \ldots$ ज्ञात कीजिये। तो आप देखेंगे कि हर बार, $l_1\sqrt{T_1}, l_2\sqrt{T_2}, l_3\sqrt{T_3}, \ldots$ का मान लगभग समान आता है।

सहायक तार पर T व m' स्थिर है। अतः लम्बाई के नियम से $n \propto \frac{1}{l}$

मुख्य तार पर l, m स्थिर हैं और T बदल रहा है। अतः तनाव के नियम से,

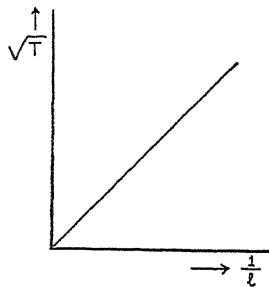
$$n \propto \sqrt{T}$$

दोनों को मिलाने से $\sqrt{T} \propto \frac{1}{l}$

अथवा $l\sqrt{T} =$ स्थिरांक,

$$\therefore \quad l_1\sqrt{T_1} = l_1\sqrt{T_2} = l_3\sqrt{T_3} = \ldots$$

परन्तु यहाँ पर यह ध्यान रखना है कि इस व्यंजक ($l\sqrt{T}$) में T मुख्य तार का तनाव है और l सहायक तार की संगत लम्बाई है।

Y–अक्ष पर $\sqrt{T}$ और X–अक्ष पर $\frac{1}{l}$ लेकर खींचा हुआ ग्राफ मूल विन्दु से गुज़रने वाली सरल रेखा होगी।

चित्र 22

3. **संहति का नियम (Law of mass)—**

$\frac{1}{\sqrt{m}}$ यदि T व l स्थिर रहे।

क्योंकि $m = \pi r^2 d$ जहाँ $r =$ तार का अर्द्धव्यास, $d =$ घनत्व है अतः इसको हम दो उप-नियमों में बाँट सकते हैं—

(a). $n \propto \frac{1}{\sqrt{d}}$ यदि $T, l,$ व r स्थिर रहे

और (b). $n \propto \frac{1}{r}$ यदि $T, l,$ व d स्थिर रहें।

उपनियम 3 (a) के अनुसार समान तनाव (T) से खिंचे हुए मोटाई (r) और लम्बाई (l) में बराबर तारों के कम्पन की आवृत्ति पदार्थ के घनत्व के वर्गमूल ($\sqrt{d} \propto n$)

के व्युत्क्रमानुपाती होती है। यदि घनत्व चौगुना हो जाय, तो आवृत्ति आधी रह जायेगी।

इसी प्रकार यदि एक ही धातु के विभिन्न मोटाई (r) के तारों से प्रयोग करने से ज्ञात होगा कि T, l स्थिर रखते हुये यदि तार की मोटाई दूनी हो जाय, तो आवृत्ति आधी रह जायेगी। [उपनियम 3 (b)]

संहति-नियम का सत्यापन--पिछले नियम की तरह सुरमापी पर एक सहायक तार और एक प्रयोगिक तार लगाइये। दोनों पर लगे हुये तनाव T और T' प्रयोग के अन्त तक स्थिर रहेंगे। मान लीजिये प्रयोगिक तार और सहायक तार के लिये प्रति सें० मी० संहति m_1, m' हैं। अब मुख्य तार की l' सें० मी० लम्बाई के संगत सहायक तार की लम्बाई l_1 ज्ञात कीजिये जिससे सुरैक्य (unison) हो जाय।

अब प्रयोगिक तार के स्थान पर $m_2, m_3, m_4 \ldots$ प्रति सें० मी० संहति वाले तार एक-एक करके लगाइये और प्रत्येक को T' तनाव देकर उनकी l' सें० मी० लम्बाई के संगत सहायक तार की लम्बाइयाँ $l_2, l_3, l_4 \ldots$ ज्ञात कर लीजिये।

आप देखेंगे कि हर बार $\frac{l_1}{\sqrt{m_1}}$, $\frac{l_2}{\sqrt{m_2}}$, $\frac{l_3}{\sqrt{m_2}} \ldots$ का मान लगभग बराबर आता है।

सहायक तार पर T और m' स्थिर हैं। अतः लम्बाई के नियमानुसार, $n \propto \frac{1}{l}$

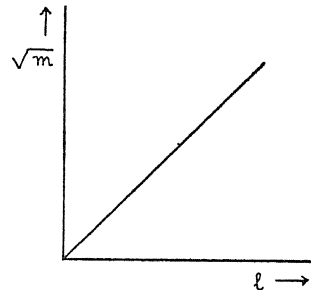
और प्रयोगिक तार में तनाव T' व लम्बाई l' स्थिर है इसलिये संहति के नियम से—

$$n \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$$

दोनों को मिलाने से $\frac{1}{l} \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$

वा $l \propto \sqrt{m}$

या $\frac{l}{\sqrt{m}} =$ स्थिरांक

$$\therefore \quad \frac{l_1}{\sqrt{m_1}} = \frac{l_2}{\sqrt{m_2}} = \frac{l_3}{\sqrt{m_3}}$$

चित्र 23

परन्तु यहाँ फिर यह समझ लेना है कि l सहायक तार की लम्बाई है और m प्रयोगिक तार की प्रति सें० मी० संहति।

Y–अक्ष पर और $\sqrt{m}$ और X–अक्ष पर l लेने से ग्राफ़ में एक सरल रेखा आयेगी जो मूल बिन्दु से गुजरती है।

5.6. **सुरमापी से स्वरित्र की आवृत्ति ज्ञात करना**—मान लीजिये सुरमापी के तार की प्रति सें० मी० संहति m ग्राम/सें० मी० है। M ग्राम भार लगाकर Mg डाइन का तनाव (T) उत्पन्न कीजिये जहाँ g=प्रयोगशाला में गुरुत्व जनित त्वरण (Acc. due to gravity) है।

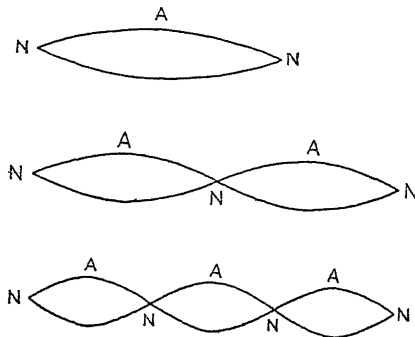
स्वरित्र को बजा कर अनुनाद बक्स पर रखिये और एक सेतु को स्थिर रख कर दूसरे को इतना चलाइये कि सुरैक्य (unison) उत्पन्न हो जाय। सुरैक्य की पहचान सवार (rider) की रीति के अतिरिक्त संकर ध्वनि (beats) की भी है। सुरैक्य से पहले तार और स्वरित्र को साथ बजाने से संकर ध्वनि उत्पन्न होगी। जैसे-जैसे सुरैक्य की स्थिति पास आती जायेगी संकर ध्वनि की आवृत्ति कम होती जायेगी। सुरैक्य आने पर संकर ध्वनियाँ बिल्कुल विलुप्त हो जायेंगी और तार में अनुनाद कम्पन होगा।

मान लीजिये सुरैक्य पर सेतुओं के बीच की तार की लम्बाई l सें० मी० है, तो तार के कम्पन की आवृत्ति,

$$n=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{Mg}{m}} \text{ हुई।}$$

परन्तु, तार की आवृत्ति स्वरित्र की आवृत्ति के बराबर है (सुरैक्य), अतः स्वरित्र की आवृत्ति भी

$$n=\frac{1}{2l}\sqrt{\frac{Mg}{m}} \text{ हुई।}$$

5.7. **डोरी के कम्पन की विभिन्न दशायें (Modes of vibration)**—खिची हुई डोरी के दोनों सिरों पर निःस्पन्द और बीच में प्रस्पन्द उसके कम्पन की मौलिक दशा (Fundamental mode) है। और उससे उत्पन्न हुई आवृत्ति उसकी मौलिक आवृत्ति या प्रथम प्रसंवादी (Harmonics) कहलाती है। (पहली पंक्ति)

इस समय $l=\lambda/2$

$\therefore \quad n_1=V/\lambda=V/2l$

V तरंग का वेग है।

चित्र 24

चित्र की दूसरी और तीसरी पंक्ति में डोरी के कम्पन की दूसरी व तीसरी दशायें दिखाई गई हैं। सेतुओं के बीच इनमें क्रम से दो और तीन प्रस्पन्द बिन्दु है तथा एक व दो निःस्पन्द।

अतः, $l=\lambda_2$, $l=3/2\lambda_3$

∴ $n_2=V/\lambda_2$, $n_3=V/\lambda_3$

$$=\frac{V}{l}=2.\frac{V}{2l} \qquad =3.\frac{V}{2l}$$

∴ $n_1 : n_2 : n_3=1 : 2 : 3$

दूसरी व तीसरी दशाओं में उत्पन्न हुई आवृत्तियाँ मौलिक आवृत्ति की क्रम से दूनी व तीन गुनी हैं। इनको क्रमशः द्वितीय प्रसंवादी (Second Harmonic) व तृतीय प्रसंवादी (Third Harmonic) कहते हैं।

इसी प्रकार अन्य ऊँचे प्रसंवादी भी उत्पन्न हो सकते हैं

संगीत वाद्यों से उत्पन्न हुई ध्वनियों में मौलिक आवृत्ति के साथ अन्य ऊँचे प्रसंवादी भी उपस्थित रहते हैं। ऐसी ध्वनि को मिश्रित ध्वनि (Note) कहते हैं।

उदाहरण—1. एक तार जिसकी लम्बाई 50 सें० मी० है, प्रति से० 100 बार कम्पन करता है। यदि इसकी लम्बाई घटा कर 30 सें० मी० कर दी जाय तथा इसका खिचाव बल बढ़ा कर पहले का चार गुना कर दिया जाय, तब इसकी आवृत्ति क्या होगी ?

[यू० पी० बोर्ड]

माना कि तार की प्रति सें० मी० संहति m और तनाव T डाइन है, तो,

$n=1/2l\sqrt{T/m}$ के अनुसार

$$100 = \frac{1}{2\times50}\sqrt{\frac{T}{m}}\,..(1)$$ हुआ।

अब तनाव$=4T$, और $l=30$ सें० मी० है। तो मान लीजिये आवृत्ति n है।

$$n=\frac{1}{2\times30}\sqrt{\frac{4T}{m}}\,..(2)$$

(2) में (1) का भाग देने से,

$$\frac{n}{100}=\frac{2\times50}{2\times30}\times\frac{\sqrt{4\times T/m}}{\sqrt{T/m}}$$

$$=5/3\sqrt{4}=10/3$$

$$\therefore\quad n=10/3\times100=333\cdot3$$

उदाहरण—2. दो तार जिनकी लम्बाइयों में 3:2 का अनुपात है, समान खिचाव बल पर लगाये गये हैं और तब एक ही आवृत्ति की ध्वनि दोनों से उत्पन्न होती है। यदि ये तार विभिन्न पदार्थों के हैं और इनके अर्द्धव्यास का अनुपात 1 : 2 है, तो इनके घनत्वों का अनुपात निकालिये।

मान लीजिये दोनों तारों पर T तनाव है और दोनों से n आवृत्ति निकल रही है। पहले की लम्बाई l_1, दूसरे की l_2 पहले का अर्द्धव्यास r_1, दूसरे का r_2; और दोनों के घनत्व क्रमशः d_1, d_2 हैं। तो

$$n = \frac{1}{2lr}\sqrt{\frac{T}{\pi d}}$$ सूत्र से—

पहले तार के लिये,

$$n = \frac{1}{2l_1 r_1}\sqrt{\frac{T}{\pi d_1}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

और दूसरे के लिये,

$$n = \frac{1}{2l_2 r_2}\sqrt{\frac{T}{\pi d_2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

(2) में (1) का भाग देने से,

$$1 = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}$$

परन्तु, $\frac{l_1}{l_2} = \frac{3}{2}$, $\frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{2}$

$$\therefore \quad 1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2}\sqrt{\frac{d_1}{d_2}}$$

$$\therefore \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} = \frac{4}{3}$$

और $\frac{d_1}{d_2} = \frac{16}{9}$

अतः दोनों के घनत्वों का अनुपात 16:9 हुआ।

सारांश

प्रत्यास्थता रखनेवाली वस्तु को मध्यस्थिति से हटा कर स्वतन्त्र छोड़ देने पर कम्पन होते हैं, वस्तु के स्वतन्त्र कम्पन कहलाते हैं।

तनी हुई डोरी में अनुप्रस्थ तरंगों का वेग $V = \sqrt{T/m}$

T = डोरी का तनाव

m = एक सें० मी० की संहति

डोरी के कम्पन की आवृत्ति $n = \frac{1}{2l}\sqrt{T/m}$.

l = डोरी की लम्बाई।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. स्वतन्त्र, प्रभावित और अनुनाद कम्पनों को भली-भाँति समझाइये। तनी डोरी के स्वतन्त्र अनुप्रस्थ कम्पनों की आवृत्ति के लिये व्यंजक निकालिये।

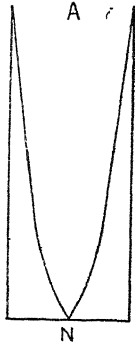
2. तनी डोरी के अनुप्रस्थ कम्पन के नियमों का वर्णन कीजिये। इन नियमों का सत्यापन कैसे करेंगे ?
3. सुरमापी का वर्णन कीजिये। इसकी सहायता से किसी अज्ञात स्वरित्र की आवृत्ति कैसे निकालेंगे ?
4. एक तार की लम्बाई 55 से० मी० है। दो सेतुओं द्वारा इसके ऐसे तीन भाग कीजिये जिनसे उत्पन्न आवृत्तियों का अनुपात 1 : 2 : 3 हो।
(**उत्तर**—30, 15, 10 सें० मी०)
5. एक तार जिसकी लम्बाई 15 सें० मी० है, तथा संहति ·5 ग्राम है, इतने खिचाव-बल पर लगाया गया कि इससे 80 आवृत्ति प्र० से० की ध्वनि निकलती है। बतलाइये कितने ग्राम भार का खिंचाव-बल तार पर लगाया गया है ? किस प्रकार इस तार की आवृत्ति दोगुनी की जा सकती है—(क) तार की लम्बाई बदल कर, (ख) तार का खिचाव-बल बदलने पर ? (यू० पी० बोर्ड)
6. एक तार का टुकड़ा जिस पर 1 किलोग्राम भार का खिंचाव-बल है 320 आवृत्ति वाले स्वरित्र के साथ स्वर-मेल उत्पन्न करता है। इसके खिचाव-बल में क्या परिवर्तन किया जाय कि यह 256 आवृत्ति वाले स्वरित्र के साथ स्वर-मेल उत्पन्न करे ?
7. चार तार एक ही लम्बाई के हैं, और एक ही द्रव्य से बने हैं ; उनके व्यास, 1 : 2 : 3 : 4 के अनुपात में हैं और उन्हें इतना खींचा जाता है कि उन पर प्रभंजन चाप (breaking stress) का आधा चाप क्रियात्मक होता है। उनके मूल स्वरों की तुलना कीजिये। (**उत्तर**—सब के स्वर वही होंगे।)
8. एक तार को एक भार से इस प्रकार खींचा जाता है कि उस पर, 64′ प्रतिसेकिंड के वेग से एक कूबड़ (hump) चल रहा है। इस तार पर, 4′ की दूरी पर दो बिन्दुओं को दृढ़ता से कस दिया जाता है। यदि तार के इस भाग को बजाया जाये, तो क्या स्वर निकलेगा ? (**उत्तर**—8 प्रतिसेकिंड)
9. दो तार क्रमश: 10 और 1 किलोग्राम के भारों से खींचे जाते हैं। वे प्रत्येक 1 मीटर लम्बे हैं, और एक ही व्यास के हैं, पर उनके घनत्व 7.8 : 1 के अनुपात में हैं। उनके तारत्वों (frequencies) की तुलना कीजिये। (**उत्तर**—113 : 1)
10. चार तार बिल्कुल एक समान ही एक ही बाँट से खिंचे हुए बराबर बराबर कम्पन उत्पन्न करते हैं। यदि इन चारों को एक बारीक रेशम के तागे से बाँध कर एक मोटा तार बना दें, तो उसका कम्पनांक क्या होगा ? (**उत्तर**–कोई परिवर्तन न होगा)
11. एक तार 25 पौंड के बाँट से खिंचा है। कम्पन से एक विशेष स्वर निकलता है। इसी वस्तु के बने हुए एक तार पर जिसकी मोटाई और लम्बाई पहले से दुगनी है, कितना बाँट लगावें कि एक सप्तक ऊँचा स्वर निकले ? (**उत्तर**—1600 पौंड)

अध्याय 6

वायु-स्तम्भ में अनुदैर्घ्य कम्पन

(Longitudinal Vibrations of Air-Columns)

6.1. क्लैरियनट, बांसुरी, बिगुल, तुरही आदि वायु वाद्य यंत्रों (wind-instruments) में वायु के निश्चित आयतन के कम्पनों से ही उनका विशिष्ट स्वर उत्पन्न होता है। यन्त्र के वायुकोष्ट की आकृति और आकार ही उससे निकलने वाली ध्वनि के तारत्व (Pitch) और गुण (Quality) का नियन्त्रण करते हैं। अध्ययन की सरलता के लिये हम इकसार बेलनाकार खोखली नलिका में भरी वायु के अप्रगामी अनुदैर्घ्य कम्पनों पर विचार करेंगे। इस प्रसंग में दो प्रकार की नलिकायें आती हैं—
(1) बन्द नलिका (closed tube)—इसका एक सिरा खुला और दूसरा बन्द होगा।
(2) खुली नलिका (open tube)—इसके दोनों सिरे खुले होंगे।

6.2. **बन्द नलिका (Closed Tube) के कम्पन**—नलिका को कम्पित करने के लिये उसके खुले मुँह (सिरे) के पास उपयुक्त आवृत्ति का उद्वेलन उत्पन्न किया जायेगा जिससे नली के वन्द सिरे की ओर उसमें एक अनुदैर्घ्य तरंग चलने लगे। संपीडन (विरलन) की तरंग बन्द सिरे से परावर्तित होकर संपीडन (विरलन) की तरंग के ही रूप में उसी मार्ग से लौटेगी। खुले सिरे के पास नली के मुँह के बाहर रहने वाले वायु कण विस्थापन के लिये नली में घिरे हुए वायु कणों की अपेक्षा अधिक स्वतन्त्र है। अतः यह सिरा हट सकने वाले (yielding) तल की तरह कार्य करेगा। बन्द सिरे से परावर्तित होकर नीचे से आने वाली संपीडन (विरलन) की तरंग खुले सिरे पर परावर्त्तन के बाद विरलन (संपीडन) में बदल जायेगी। यदि उत्प्रेरक भी इसी समय नीचे की ओर विरलन (संपीडन) भेजे तो दोनों का प्रभाव जुड़कर उद्घोषित ध्वनि उत्पन्न करेगा।

चित्र 25

यह नालिका के कम्पन की मौलिक दशा हुई। इसमें उत्प्रेरक अपना आधा आवर्त्तकाल इतने समय में पूरा करता है जितने समय में तरंग बंद सिरे तक जाती और परावर्त्तन के बाद खुले सिरे तक आती है। दो तरंगों के अधिस्थापन से अनुदैर्घ्य अप्रगामी तरंगें उत्पन्न होंगी। बन्द सिरे पर निस्पन्द (Node) विन्दु होगा और खुले सिरे पर प्रस्पन्द (Antinode)।

6.3. **कम्पन की अन्य दशायें**—नीचे बन्द नलिका के कम्पन की विभिन्न दशायें, निस्पन्द (Node) और प्रस्पन्द (A) विन्दुओं की स्थिति के साथ दिखाई

गई है। चित्र के नीचे संगत तरंगों की आवृत्ति और तरंग दैर्घ्य (λ) का तुलनात्मक विवरण भी दिया है—

प्रथम (मौलिक) द्वितीय तृतीय

चित्र 26

$$l = \frac{\lambda_1}{4} \qquad l = 3\frac{\lambda_2}{4} \qquad l = 5\frac{\lambda_3}{4}$$ [l=नलिका की लम्बाई]

$$\lambda_1 = 4l \qquad \lambda_2 = \frac{4l}{3} \qquad \lambda_3 = \frac{4l}{5}$$

$$n_1 = \frac{v}{\lambda_1} \qquad n_2 = \frac{v}{\lambda_2} \qquad n_3 = \frac{v}{\lambda_3}$$ [v=तरंग वेग]

$$= \frac{v}{4l} \qquad = 3.\frac{v}{4l} \qquad = 5.\frac{v}{4l}$$

$$= 3n_1 \qquad = 5n_1$$

$$\therefore \quad n_1 : n_2 : n_3 : \ldots . = 1 : 3 : 5 : \ldots .$$

बन्द नलिका की विभिन्न कम्पन दशाओं में उत्पन्न होने वाली ध्वनियाँ उसकी मौलिक आवृत्ति (Fundamental frequency) की प्रथम प्रसंवादी, तृतीय प्रसंवादी, पंचम प्रसंवादी,...होती हैं। अर्थात् बन्द नलिका से केवल विषम (odd) प्रसंवादी (Harmonics) ही उत्पन्न हो सकते हैं। सम (even) प्रसंवादियों (Harmonics) का उत्पन्न करना असम्भव है।

6.4. **खुली नलिका (Open Tube)**—खुली नलिका के एक सिरे के सामने उपयुक्त आवृत्ति का उद्वेलन (स्वरित्र आदि से) करने से संपीडन और विरलन की तरंगें बारी बारी से समान निश्चित वेग से चलती हैं। दूसरे सिरे से परावर्तित होकर

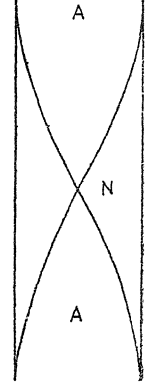
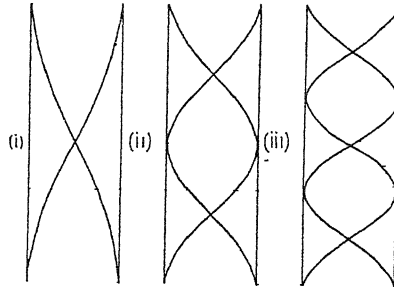
आपतित तरंग के साथ अधिस्थापन से अप्रगामी तरंगें बनाती है। सिरों पर अन्दर की वायु की अपेक्षा बाहर की वायु के लिये गति की अधिक स्वतन्त्रता है। अतः दोनों सिरों पर प्रस्पन्द (Anti-node) तथा बीच में एक निस्पन्द (Node) बनेगा।

चित्र 27

यह नलिका के कम्पन की मौलिक दशा है। संगत तरंग का तरंग दैर्ध्य (λ) नलिका की लम्बाई का दूना होगा।

खुली नलिका के कम्पन की अन्य दशाएँ—l सें० मी० लम्बी खुली नलिका के कम्पन की विभिन्न दशाएँ नीचे प्रदर्शित हैं। उत्पन्न होने वाली आवृत्ति और तरंग दैर्घ्यों का तुलनात्मक विवरण भी दिया है।

प्रथम (मौलिक) द्वितीय तृतीय

(i) (ii) (iii)

चित्र 28

$l=\lambda_1/2$ $\qquad l=\lambda_2$ $\qquad l=3\frac{\lambda_3}{2}$

$\lambda_1=2l$ $\qquad \lambda_2=2l/2$ $\qquad \lambda_3=2l/3$

$n_1=v/\lambda_1$ $\qquad n_2=v/\lambda_2$ $\qquad n_3=v/\lambda_3$ (v=तरंग वेग)

$=v/2l$ $\qquad =2.\frac{v}{2l}$ $\qquad =3.\frac{v}{2l}$

$=2n_1$ $\qquad =3n_1$

$$\therefore \quad n_1 : n_2 : n_3 : \ldots = 1 : 2 : 3 : \ldots .$$

खुली नलिका की विभिन्न कम्पन दशाओं से उत्पन्न होने वाली ध्वनियों की आवृत्ति उसकी मौलिक आवृत्त की एक गुनी, दो गुनी, तीन गुनी...आदि होती हैं। अर्थात् खुली नलिका से प्रथम, द्वितीय, तृतीय...आदि विषम (odd) तथा सम (even) समस्त प्रसंवादी (Harmonics) उत्पन्न किये जा सकते हैं।

याद रहे कि बन्द नलिका से केवल विषम प्रसंवादी ही उत्पन्न होते हैं।

6.5. बराबर लंबाई की बंद और खुली नलिकाओं के कंपनों की तुलना—

मौलिक कम्पन—कम्पन की प्रथम अवस्था में बन्द नली में खुले सिरे पर प्रस्पन्द और बन्द सिरे पर निस्पन्द होगा तथा खुली नली में दोनों सिरों पर प्रस्पन्द और मध्य में निस्पन्द होगा। अतः यदि नलिकाओं की लम्बाई (l सें० मी०) है तो—

$l=\lambda_c/4$ $\qquad$ $l=\lambda_0/2$

$\lambda_c=4l$ $\qquad$ $\lambda_0=2l.$

$$\therefore \lambda_0 : \lambda_c = 1:2$$

$n_c=v/\lambda_c$ $\qquad$ $n_0=v/\lambda_0$

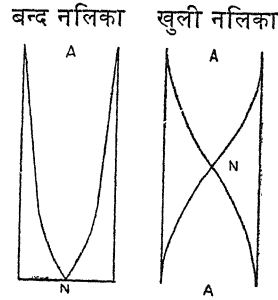
$=v/4l$ $\qquad$ $=v/2l=2.\dfrac{v}{4l}$

$$\therefore n_c : n_0 = 1:2$$

बन्द नलिका खुली नलिका

चित्र 29

यहाँ पर नलिकाओं की लम्बाई l सें० मी० है—

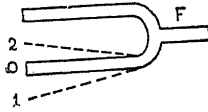
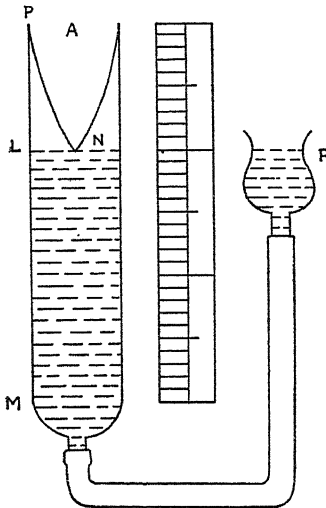
तरंग वेग$=v$,

λ_c, nc और λ_0, n_0 क्रमशः बन्द और खुली नलिका में उत्पन्न हुई तरंग दैर्घ्य और आवृत्तियाँ हैं।

स्पष्ट है कि बन्द नलिका की मौलिक आवृत्ति खुली नलिका की मौलिक आवृत्ति से आधी होती है।

कम्पन की अन्य दशाएँ:—हमने देखा कि समान लम्बाई की खुली नलिका की मौलिक आवृत्ति बन्द नलिका की संगत आवृत्ति की दूनी होती है। परन्तु खुली नलिका जहाँ समस्त (सम व विषम) प्रसंवादी उत्पन्न कर सकती है बन्द नलिका केवल विषम प्रसंवादी ही उत्पन्न कर सकती है। अतः यदि n_{1c}, n_{10}; n_{2c}, n_{20}; n_{3c}, n_{30} आदि क्रमशः बन्द व खुली नलिका की प्रथम, द्वितीय, तृतीय, कम्पन दशा की आवृत्तियाँ हैं तो—

कम्पन दशा (x)	बन्द नलिका	खुली नलिका	$n_{xc} : n_{x0}$
1.	n_{1c}	n_{10}	1:2
2.	$n_{2c}=3n_{1c}$	$n_{20}=2n_{10}$ $=4n_{1c}$	3:4.
3.	$n_{3c}=5n_{1c}$	$n_{30}=3n_{10}$ $=6n_{1c}$	5:6
4.	$n_{4c}=7n_{1c}$	$n_{40}=4n_{10}$ $=8n_{1c}$	7:8
. . .	. . .	. . .	.
x	$n_{xc}=(2x-1)\ n_{1c}$	$n_{x0}=xn_{10}$ $=2xn_{1c}$	$(2x-1):2x$

ऊपर की तालिका से आप सरलता से यह देख सकते हैं कि समस्त कम्पन दशाओं में खुली नली सदैव ऊँचे तारत्व की ध्वनि निकालती है। x वीं कम्पन दशा में दोनों की संगत आवृत्तियाँ $(2x-1) : 2x$ की निष्पत्ति में होती है।

6.6. **प्रान्तीय संशोधन (End correction)**—बन्द और खुली दोनों नलिकाओं के खुले सिरे पास नलिका के बाहर वाले वायुकण अन्दर वाले वायुकणों की अपेक्षा विस्थापन के लिये अधिक स्वतन्त्र हैं। अतः उद्वेलन सिरे से कुछ दूर तक बढ़ जाता है। प्रस्पन्द विन्दु ठीक सिरे पर स्थित न होकर उससे थोड़ा दूर (x सें० मी०) बाहर की ओर स्थित होता है। अतः कम्पायमान वायु स्तम्भ की लम्बाई नलिका की वास्तविक लम्बाई से अधिक होती है। प्रस्पन्द की वास्तविक स्थिति और नलिका के सिरे के वीच की दूरी को **प्रान्तीय संशोधन** (End correction) कहते हैं। अतः यदि प्रां० सं० x सें० मी० है और नली l सें० मी० लम्बी है तो कम्पित वायु स्तम्भ की लम्वाई $(l+x)$ वन्द नली के लिये और $(l+2x)$ खुली नली के लिये हुई।

प्रां० सं० मान खुले मुँह के आकार व आकृति और उत्पन्न होने वाले तरंग दैर्घ्य पर निर्भर करता है। वृत्ताकार मुँह के लिये प्रां० सं० का सूत्र हैमहोज़ (Helmholtz) में और रैले (Rayleigh) ने $0{\cdot}6\, r$ दिया जहाँ r मुँह की त्रिज्या है।

चित्र 30

6.7. **अनुनाद स्तम्भ (Resonance Column) से वायु वेग और "प्रान्तीय संशोधन" निकालना**—अनुनाद स्तम्भ में कांच या पीतल की एक लम्बी नलिका PLM है जो एक उर्ध्व पैमाने के साथ कस दी जाती है। पानी के आगार (Reservoir) R और PLM को रबड़ की नली से जोड़ देते हैं। नली में पानी के तल L को ऊपर नीचे करके कम्पायमान वायुस्तम्भ PL की लम्बाई ऐसी नियन्त्रित करते हैं कि खुले मुँह पर रखे हुए स्वरित्र से सुरैक्य (unison) हो जाय।

प्रयोग—R को ऊपर करके पानी का तल नली के मुँह के पास कीजिये। अब रबड़ की नली को पैर से दबाये हुए R को नीचे कस दीजिये। स्वरित्र को बजाकर मुँह के पास चित्र की भांति रखिये। स्वरित्र की दोनों भुजाओं को मिलाने वाली रेखा नली की अक्ष के समान्तर रहे। पैर का दबाव धीरे-धीरे कम करते जाइये। पानी का

तल L भी धीरे-धीरे नीचा होता जायेगा और कम्पित स्तम्भ की लम्वाई बढ़ती जायेगी। जब नली से अधिकतम उद्घोषिता की ध्वनि निकलने लगे पैर का दबाव फिर बढ़ा दीजिये। पैमाने की सहायता से कम्पित स्तम्भ PL की लम्वाई नाप लीजिये। मान लीजिये यह l_1 सें० मीटर है।

स्वरित्र अपनी नं० 2 स्थिति से नं० 1 स्थिति तक आते समय नीचे की ओर संपीडन तरंग भेजेगा; और 1 से 2 तक जाते समय विरलन तरंग। संपीडन तरंग पानी की सतह (सुदृढ़ दीवार की तरह) से परावर्तित होकर संपीडन तरंग के रूप में ऊपर आयेगी और खुले मुँह (हट सकने वाला तल) पर परावर्तन के उपरान्त विरलन तरंग के रूप में नीचे चलेगी। परन्तु यदि स्वरित्र इसी समय 2 से 1 आने की यात्रा समाप्त करके 1 से 2 की ओर चलना प्रारम्भ करे तो स्वरित्र द्वारा भेजा हुआ विरलन परावर्तित विरलन से मिलकर नली में अनुनाद उत्पन्न करेगा। ध्वनि उद्घोषित हो जायगी।

परिणामित अप्रगामी तरंग का निस्पन्द बिन्दु पानी के तल L पर और प्रस्पन्द खुले मुँह पर होगा। स्पष्ट है कि जितने समय में स्वरित्र $\frac{1}{2}$ कम्पन पूरा करता है तरंग PL लम्बाई को दो बार पार करती है। अतः

$$2l_1 = \frac{\lambda}{2}$$

परन्तु यदि प्रां० सं० x सें० मी० हो तो—

$$(l_1 + x) = \frac{\lambda}{4} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

यह अनुनाद की प्रथम स्थिति है। पैर का दबाव फिर कम कीजिये। पानी का तल गिरता जायेगा। जब कम्पायमान स्तम्भ की लम्वाई प्रथम स्थिति की लम्बाई की लगभग तीन गुनी है तो पुनः उद्घोषित ध्वनि सुनाई देगी। इस बार जितने समय में तरंग नली की लम्बाई को दो बार पार करती है उतने ही समय में स्वरित्र 3/2 कम्पन पूरे करता है। पानी के तल पर निस्पन्द और खुले मुँह पर प्रस्पन्द के अतिरिक्त बीच में एक निस्पन्द और एक प्रस्पन्द और होगा, जिनकी स्थिति चित्र में दिखाई है। अतः इस बार यदि l_2 नली की लम्बाई है तो—

$$\frac{3\lambda}{2} = 2l_2$$

और प्रां० सं० लगा कर

चित्र 31

$$(l_2 + x) = \frac{3\lambda}{4} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

समीकरण (1) और (2) की सहायता से प्रां० सं० x और λ का मान निकाला जा सकता है। फिर उससे तरंग का वेग।

ध्वनि वेग—समीकरण (2) में से (1) को घटाने से

$$l_2 - l_1 = \lambda/2$$
$$\therefore \quad \lambda = 2\,(l_2 - l_1)$$

सुरैक्य की स्थिति में स्वरित्र की आवृत्ति n तरंग (ध्वनि) की आवृत्ति के बराबर होगी। अतः ध्वनि वेग,

$$V = n\lambda$$
$$= 2n\,(l_2 - l_1)$$

प्रान्तीय संशोधन—समीकरण (2) में (1) का भाग देने से,

$$\frac{l_2 + x}{l_1 + x} = 3$$
$$\therefore \quad l_2 + x = 3\,(l_1 + x)$$
$$= 3l_1 + 3x$$

अथवा $$2x = (l_2 - 3l_1)$$

तथा $$x = \frac{(l_2 - 3l_1)}{2}$$

उदाहरण 1. आवृत्ति 256 प्रति से० के एक स्वरित्र के लिये एक अनुनाद बक्स बनाना है। यदि बक्स का एक सिरा बन्द रखना है, तो इस बक्स की लम्बाई बतलाइये। हवा में ध्वनि का वेग 1120 फुट प्रति से० है। क्या यही अनुनाद बक्स किसी अन्य आवृत्ति वाले स्वरित्र के लिये भी काम आ सकता है? यदि हाँ, तो बतलाइये किन स्वरित्रों के लिये। [यू० पी० बोर्ड]

अनुनाद के समय स्वरित्र की आवृत्ति बक्स (बन्द नलिका) की मौलिक आवृत्ति के बराबर होगी। यदि बक्स की लम्बाई l सें० मी० है, तो उत्पन्न ध्वनि तरंग का $\lambda = 4l$.

$\therefore$ ध्वनि वेग $V = n\lambda$

परन्तु, $V = 1120$ फुट/से०, $n = 256$

$$\therefore \quad 256 \times 4l = 1120$$

$$l = \frac{1120}{256 \times 4}$$

$$= \frac{35}{32} \text{ फुट}$$

$$= 1 \text{ फुट } 1{\cdot}125 \text{ इंच}$$

$\therefore$ अनुनाद बक्स की लम्बाई $= 1$ फुट $1{\cdot}125$ इंच

क्योंकि बन्द नलिका में मौलिक कम्पन के साथ-साथ कम्पन की अन्य अवस्थाओं में तृतीय, पंचम आदि विषम प्रसंवादी भी उत्पन्न हो सकते हैं अतः यही अनुनाद बक्स 256, 256×3 (=768), 256×5 (=1280)...आदि आवृत्ति के स्वरित्रों के लिये भी काम दे सकता है।

उदाहरण 2. 256 आवृत्ति के स्वरित्र को अनुनाद स्तम्भ के ऊपर रखने से 31 से० मी० और 95·2 सें० मी० वायु स्तम्भ की लम्बाई होने पर अनुनाद आता है। प्रान्तीय संशोधन और ध्वनि-वेग की गणना कीजिये।

यदि प्रा० सं० x है, तो,

$$31+x = \lambda/4. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

$$95{\cdot}2+x = 3\lambda/4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

(2) में से (1) को घटाकर, $64{\cdot}2 = \lambda/2$

$$\therefore \quad \lambda = 128{\cdot}4 \text{ सें० मी०}$$

तथा ध्वनि-वेग $V = n\lambda$

$$= 256 \times 128{\cdot}4$$

$$= 32870{\cdot}4 \text{ सें० मी०/से०}$$

$$= 328{\cdot}70 \text{ मी०/से०}$$

समीकरण (2) में (1) का भाग देने से,

$$\frac{95{\cdot}2 + x}{31 + x} = 3$$

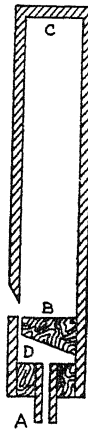
$$\therefore \quad 3x+93 = 95{\cdot}2+x$$

$$\text{वा} \quad 2x = 95{\cdot}2 - 93$$

$$= 2{\cdot}2$$

$$\therefore \quad x = 1{\cdot}1 \text{ सें० मी०}$$

चित्र 32

6.8. **वायु वाद्य यन्त्रों का कम्पन**—आर्गन नलिका (**Organ pipe**)—आर्गन नलिका की बनावट सामने के चित्र की भाँति होती है। कम्पन करने वाले वायु स्तम्भ की लम्बाई BC के बराबर है। A पर फूंकने से D वायुकोष्ठ में दबाव बढ़ता है, जिससे बगल के छेद से निकल कर वायु वेग के साथ सामने की पत्ती पर टकराती है। पत्ती के कम्पनों से और छेद से निकलने वाली तेज़ वायु से तीव्र उद्वेलन होता है, जिसमें अनेक आवृत्तियों की उपस्थित रहती है। उनमें से नलिका केवल उन्हीं आवृत्तियों को छाँट कर अनुनाद उत्पन्न करती है, जो वायु स्तम्भ BC की मौलिक आवृत्ति अथवा अन्य उच्चतर प्रसंवादियों की आवृत्ति के बराबर होती हैं।

अनुनाद के समय B पर प्रस्पन्द (*A.* Node) होगा और C पर बन्द नली के लिये नि:स्पन्द तथा खुली नली के लिये प्रस्पन्द होगा।

फूँकने का दवाव बढ़ा कर उच्चतर प्रसंवादी उत्पन्न किये जा सकते हैं।

बाँसुरी की नली में छेद होते हैं जिनको खोलने या बन्द करने से कम्पायमान वायु स्तम्भ की लम्बाई घटा बढ़ा कर वांछित आवृत्तियाँ निकाली जा सकती हैं।

सारांश

बन्द नलिका की मौलिक आवृत्ति $v/4l$ होती है जहाँ v ध्वनि-वेग है और l नलिका की लम्बाई।

खुली नलिका की मौलिक आवृत्ति $v/2l$ होती है।

बन्द नलिका से केवल विषम प्रसंवादी ही उत्पन्न हो सकते हैं, परन्तु खुली नलिका से विषम और सम समस्त उच्चतर प्रसंवादी प्राप्त हो सकते हैं।

अनुनाद स्तम्भ से प्रान्तीय संशोधन x और ध्वनि-वेग v दोनों निकाल सकते हैं—

$$v = 2n\,(l_2 - l_1)$$

$$x = \frac{l_2 - 3l_1}{2}$$

यहाँ n स्वरित्र की आवृत्ति है और l_1 व l_2 दोनों अवस्थाओं की अनुनाद स्तम्भ की लम्बाइयाँ।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. बन्द और खुली नलिका से आप क्या समझते हैं। बराबर लम्बाई की बन्द और खुली नलिकाओं के मौलिक कम्पनों को चित्र से समझा कर उनकी आवृत्तियों की तुलना कीजिये।
2. बन्द नलिका की कम्पन की विभिन्न दशाओं में नि:स्पन्द और प्रस्पन्द बिन्दुओं की स्थिति समझा कर सिद्ध कीजिये कि उससे केवल विषम प्रसंवादी ही उत्पन्न हो सकते हैं।
3. चित्र द्वारा समझाइये कि खुली नलिका समस्त उच्चतर प्रसंवादी उत्पन्न कर सकती है।
4. प्रान्तीय संशोधन (End Correction) से आप क्या समझते हैं? प्रयोगशाला में इसके निकालने की विधि समझाइये।
5. अनुनाद स्तम्भ से वायु में ध्वनि का वेग 0° सेन्टीग्रेड पर कैसे निकालेंगे?
6. बन्द और खुली नलिकाओं के मौलिक कम्पनों की आवृत्तियों में 25 का अन्तर है। खुली नली की लम्बाई 66 से० मी० है। बन्द नली की लम्बाई निकालिये यदि वायु में ध्वनि का वेग 33000 सें० मी० प्रति सेकिंड हो। [यू० पी० बोर्ड]
   (उत्तर—36 2/3 या 30 सें० मी०)
7. दो स्वरित्र A व B एक साथ बजाने पर 8 संकर ध्वनि प्रति सेकिंड उत्पन्न करते हैं। एक सिरे पर बन्द अनुनाद नली के साथ दोनों स्वरित्र उस समय अनुनाद

उत्पन्न करते हैं, जब वायु स्तम्भ की लम्बाई क्रमशः 32 सें० मी० और 33 सें० मी है। दोनों स्वरित्रों की आवृत्ति बताइये। [यू० पी० बोर्ड]
(उत्तर—264, 256)

8. एक वायु स्तम्भ और एक स्वरित्र चार संकर प्रति सेकिंड उत्पन्न करते हैं। स्वरित्र की आवृत्ति (frequency) कम है, और वायु का ताप $15^\circ C$ है। जब ताप गिर कर $10^\circ C$ हो जाता है, तो दोनों से तीन संकर प्रति सेकिंड उत्पन्न होते हैं। द्विभुज की आवृत्ति क्या है? (उत्तर—110·63)
9. यदि दो वाद्य नलियाँ एक साथ $15^\circ C$ पर बजाने से 4 संकर प्रति सेकिंड उत्पन्न करती हैं, तो वे $0^\circ C$ पर कितने संकर उत्पन्न करेंगी? (उत्तर—3·98)
10. दो वाद्य नलियाँ एक साथ बजाने पर, 4 संकर प्रति सेकिंड सुनाई देते हैं। यदि छोटी नली की लम्बाई 30″ है, तो दूसरी नली की लम्बाई निकालिये।

अध्याय 7

छड़ों के कम्पन

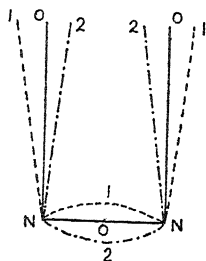
(Vibrations of Rods)

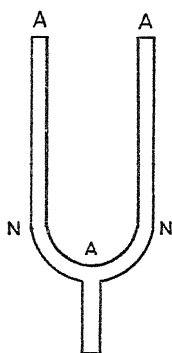
7.1. **अनुप्रस्थ कम्पन**—छड़ के एक सिरे को चित्र की भाँति शिकंजे में कस कर दूसरे सिरे को छड़ की लम्बाई के अभिलम्ब दिशा में मध्य स्थिति से हटाकर छोड़ दीजिये। छड़ में अनुप्रस्थ कम्पन शुरू हो जायेंगे। शिकंजे में कसा हुआ सिरा निस्पन्द और स्वतन्त्र सिरा प्रस्पन्द बन जायेगा।

चित्र 33

कम्पन आवृत्ति छड़ की लम्बाई, चौड़ाई, मोटाई, घनत्त्व, प्रत्यास्थाता आदि पर निर्भर करती है। लम्बाई घटाने या चौड़ाई, मोटाई बढ़ाने से आवृत्ति बढ़ जाती है। ताप बढ़ने से प्रत्यास्थता कम हो जाती है और लम्बाई बढ़ जाती है अतः आवृत्ति घट जाती है।

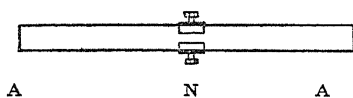
स्वरित्र (Tuning fork)—घटना की स्पष्टता और अध्ययन की सरलता के लिये एक धातु का तार अंग्रेजी अक्षर U की आकृति में मोड़िये (चित्र 34)। U की दोनों भुजाओं को अपने दोनों हाथों में पकड़कर एक साथ बाहर की ओर खींचिये। सारा तार नं० 1 स्थिति में आ जायेगा। दोनों मोड़ों (N, N) के बीच का तार मध्य स्थिति से उठकर ऊपर एक वृत्त खंड के रूप में मुड़ जायेगा। अब दोनों भुजाओं को एक साथ अन्दर की ओर झुकाइये। तो सारा तार नं० 2 स्थिति में आ जायेगा।

क्षैतिज भाग अब नीचे वृताकार रूप धारण करेगा। भुजाओं को लगातार अन्दर बाहर बारी बारी से झुकाने से क्षैतिज भाग नीचे ऊपर वक्राकार रूप में कम्पित होता रहेगा। मोड़ (N,N) पर निस्पन्द और स्वतन्त्र सिरों तथा NN के मध्य में प्रस्पन्द बन जायेगा।

चित्र 34

अब हम स्वरित्र के कम्पन को सरलता से समझ सकते हैं। अन्तर केवल इतना है कि स्वरित्र का क्षैतिज भाग NN अपेक्षाकृत छोटा होता है और बीच में प्रस्पन्द की स्थिति में एक मूँठ लगी होती है। इसका प्रभाव यह होता है कि निस्पन्द बिन्दु NN और अधिक एक दूसरे के पास आ जाते हैं तथा NN के बीच स्थित प्रस्पन्द का आयाम घट जाता है। सामने के चित्र में कम्पित स्वरित्र में निस्पन्द और प्रस्पन्द बिन्दुओं की स्थिति दिखाई गई है। स्वरित्र की भुजाओं में तो अनुप्रस्थ कम्पन होते हैं और मूँठ में अनुदैर्घ्य। यही कारण है कि मूँठ को हाथ से पकड़ने से कम्पन बन्द नहीं होते परन्तु भुजाओं को थोड़ा छूने से ही कम्पन समाप्त हो जाते हैं।

चित्र 35

स्वरित्र को मेज़ पर रखने से मूँठ के अनुदैर्घ्य कम्पन मेज़ में प्रभावित कम्पन उत्पन्न करते हैं जिससे ध्वनि की उद्घोषिता बढ़ जाती है। परन्तु क्योंकि अयाम बहुत कम है और ऊर्जा आयाम के वर्ग के समानुपाती होती है अतः स्वरित्र को दी हुई ऊर्जा बहुत धीरे-धीरे व्यय होती है और स्वरित्र पर्याप्त समय तक ध्वनि देता रहता है।

स्वरित्र में प्रसंवादी स्वर उत्पन्न नहीं होते। केवल छठा प्रसंवादी और वह भी लगभग नगण्य तीव्रता से उत्पन्न होता है। अतः शुद्ध ध्वनि (Pure tone) के लिये वरित्र ही प्रयुक्त होता है।

7.2. **अनुदैर्घ्य कम्पन**—चित्र की भाँति एक ठोस (सीसा, पीतल, स्पात आदि) इकसार छड़ ANA को मध्य विन्दु (N) पर शिकंजे में कस दीजिये। बीरोजा लगे कपड़े या शैमॉय (Chamoi) चमड़े से लम्बाई की दिशा में रगड़िये। चीं-चीं की तेज़ आवाज़ आयेगी। यह छड़ के अनुदैर्घ्य कम्पनों से ही उत्पन्न हुई है। अनुदैर्घ्य तरंग छड़ में चल कर स्वतन्त्र सिरों से परावर्तित होकर लौटेगी और पूर्व तरंग के साथ अधिस्थापन द्वारा अप्रगामी

चित्र 36

तरंग उत्पन्न करेगी। स्वतन्त्र सिरों पर प्रस्पन्द (A) और शिकंजे से कसे हुए मध्य विन्दु पर निस्पन्द (N) बन जायेगा।

कम्पन करते समय छड़ अपनी लम्बाई में बारी-बारी से बढ़ती और सिकुड़ती रहेगी। अतः तरंग वेग के लिये न्यूटन के सूत्र,

$$V=\sqrt{E/d}$$

में E के स्थान पर Y यंग मापाक रखा जायेगा।

$$V=\sqrt{Y/d} \text{ होगा।}$$

परन्तु कम्पन करते समय दोनों स्वतन्त्र सिरे प्रस्पन्द हैं अतः तरंग दैर्घ्य=छड़ की लम्बाई का दूना होगा।

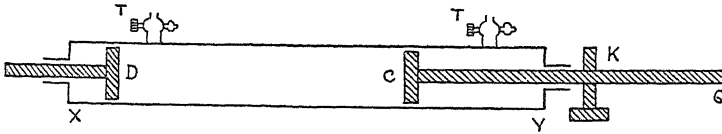
$$\therefore \quad \lambda=2l.$$

$$\text{और} \quad V=n\lambda$$

$$\therefore \quad n=V/\lambda$$

$$\therefore \text{ कम्पन आवृत्ति } n=1/2l\sqrt{Y/d}$$

छड़ की लम्बाई बढ़ाने से आवृत्ति घट जाती है।

7.3. **कुंट (Kundt) की नली**—विभिन्न गैसों व ठोस पदार्थों में ध्वनि का वेग निकालने के लिये कुंड (1889) ने इस उपकरण की रचना की। इसमें लगभग

चित्र 37

1 मीटर लम्बी और 4-5 सें॰ मी॰ अन्तः व्यास (inner dia.) की इकसार कांच की नली XY होती है। इनके दोनों ओर के मुँह खुले रहते हैं। 1 से 2 मीटर तक लम्बी इकसार धातु या कांच (अथवा प्रायोगिक ठोस) की छड़ CQ नली के एक सिरे से अन्दर जाती है। नली के अन्दर वाले छड़ के सिरे पर एक दफ्ती या अलूमीनियम की वृत्ताकार चकती C लगी रहती है जिसका व्यास नली के व्यास से थोड़ा कम होता है। नली के दूसरे सिरे से भी एक दूसरी (परन्तु छोटी) धातु की छड़ अन्दर जाती है। उसके सिरे पर भी एक कार्क या अलूमिनियम की वृत्ताकार चकती D लगी होती है। नली में लगी हुई TT टोटियों द्वारा वांछित गैस नली में भरी जा सकती है।

(i) **ठोस में ध्वनि का वेग**—जिस ठोस में ध्वनि वेग निकालना हो उसकी बनी हुई इकसार छड़ CKQ को उसके मध्य विन्दु K पर शिकंजे से ज़ोर से कस दो।

TT टोंटियों से नली में गर्म हवा भेज कर सुखा लो। फिर शुद्ध वायु भर दो। कार्क के बुरादे या लाइकोपोडियम चूर्ण की एक पतली तह नली में बिछा दो। अब छड़ के KQ अर्द्ध भाग को बीरोजा लगे हुए कपड़े से लम्बाई की दिशा में धीरे से रगड़ो। छड़ में अनुदैर्घ्य कम्पन होने लगेंगे। स्वतन्त्र सिरे C व Q प्रस्पन्द और मध्य बिन्दु K निस्पन्द बन जायेगा। कम्पन के समय छड़ अपनी लम्बाई में बार-बार बढ़ती और सिकुड़ती रहेगी। छड़ पर लगा चकती C छड़ की कम्पन आवृत्ति से आगे पीछे गति करेगी। इससे XY नली में भरी वायु में अनुदैर्घ्य तरंगे (संपीडन व विरलन) उत्पन्न होगी। अब दूसरे सिरे पर लगी चकती D को आगे पीछे चलाकर XY वायु स्तम्भ के किसी भी प्रसंवादी से छड़ CQ के मौलिक कम्पनों का अनुनाद कराते हैं। C से चलने वाली अनुदैर्घ्य तरंगे D से परावर्तित होकर उल्टी लौटेंगी और प्रथम तरंगों के साथ व्यतिकरण से अप्रगामी तरंग पैदा करेंगी। लाइकोपोडियम चूर्ण प्रस्पन्द विन्दुओं से उड़कर निस्पन्द बिन्दुओं पर ढेरियों के रूप में एकत्रित हो जायेगा। इन ढेरियों के शीर्ष पर निस्पन्द और पाद पर प्रस्पन्द होगा। बहुत सी ढेरियों पर नाप लेकर दो शीर्षों (या पादों) के बीच की दूरी l निकाल लीजिये। यह तरंग दैर्ध्य का आधा होगा।

$\therefore\ \lambda=2l.$

यदि प्रायोगिक ताप (temperature) पर वायु में ध्वनि का वेग v हो तो, $v=n\lambda$

$\therefore\ n=\frac{v}{2l}=$ कम्पन आवृत्ति,

सुरैक्य पर छड़ की मौलिक आवृत्ति भी n हुई

परन्तु छड़ में उत्पन्न हुई अनुदैर्घ्य तरंग का तरंग दैर्घ्य $\lambda_1=$ छड़ की लम्बाई L का दूना

$\therefore\ \lambda_1=2L.$

अतः छड़ में तरंग वेग $V=n\lambda_1=n2L.=\frac{v}{2l}\times 2L$

$$\therefore\ V=v.\frac{L}{l}$$

(ii) **गैस में ध्वनि वेग**—इसके लिये प्रायोगिक गैस नली में भर देते हैं और CQ छड़ ऐसे ठोस की लेते हैं जिसमें ध्वनिका वेग ज्ञात हो। पहिल की भाँति छड़ को K पर कस-कर बीरोजा लगे कपड़े से रगड़ते हैं और D को आगे पीछे करके सुरैक्य लाते हैं। लाइको-पोडियम चूर्ण की ढेरियों के शीर्ष (पाद) नाप कर दो निकटस्थ निस्पन्दों की दूरी (l) से गैस में तरंग दैर्ध्य (λ)

$\lambda=2l$ सूत्र से निकाल लेते हैं।

अब यदि छड़ की लम्बाई L हो और उसमें ध्वनि वेग V तो गैस का ध्वनि वेग v,

$V=v\frac{L}{l}$ या $v=V\frac{l}{L}$ से निकल आवेगा।

(iii) **दो गैसों में ध्वनि वेग की तुलना**—पिछले प्रयोग को दोनों गैसों के साथ दुहराते हैं। मान लीजिये A और B गैसों के लिये दो निकटस्थ ढेरियों के शीर्ष (पाद) की दूरी क्रमशः l_A व l_B है। V_A व V_B दोनों गैसों में ध्वनि वेग है और L छड़ की लम्बाई तथा V उसमें ध्वनि वेग है। तो,

$$V_A = V\frac{l_A}{L}\ ;\quad V_B = V\frac{l_B}{L}$$

$$\therefore\ \frac{V_A}{V_B} = \frac{l_A}{l_B}$$

इस प्रकार एक ही दबाव और ताप पर वायु और हाइड्रोजन भर कर,

$$V_A = \sqrt{\frac{\gamma P}{d_A}},\quad V_B = \sqrt{\frac{\gamma P}{d_B}}$$

$\therefore\ \frac{V_A}{V_B} = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}}$ सूत्र की जाँच कर सकते हैं।

(iv) **γ का मान निकालना**—गैस का दबाव P और घनत्व d नापकर और प्रयोग द्वारा उसमें ध्वनि वेग V निकालकर $V = \sqrt{\frac{\gamma P}{d}}$ सूत्र से,

$\gamma = V^2\frac{d}{P}$ द्वारा γ का मान निकाला जा सकता है। द्विपरमाण्वीय गैसों (वायु, आक्सीजन, नाइट्रोजन, हाइड्रोजन आदि) के लिये γ का मान 1·41 और एक परमाण्वीय गैस (आर्गन, नियन, क्रिप्टन आदि) के लिये 1·66 है।

(vi) **विभिन्न ताप पर गैस में ध्वनि वेग**—XY नली को विद्युत धारा से गर्म करके प्रयोग द्वारा नली में भरी गैस में किसी भी ताप पर ध्वनि का वेग ज्ञात कर सकते हैं।

सारांश

छड़ों में अनुप्रस्थ और अनुदैर्घ्य दोनों प्रकार के कम्पन उत्पन्न किये जा सकते हैं।

स्वरित्र में अनुप्रस्थ अप्रगामी कम्पन होते हैं। भुजाओं के मोड़ों पर निस्पन्द और स्वतन्त्र सिरे तथा मूँठ के जोड़ के पास प्रस्पन्द होते हैं। दो निस्पन्द और तीन प्रस्पन्द कुल होते हैं।

कुंड की नली से किसी भी ठोस या गैस में किसी भी ताप पर ध्वनि का वेग निकाला जा सकता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. स्वरित्र में कैसे कम्पन होते हैं। चित्र द्वारा निस्पन्द और प्रस्पन्द बिन्दु की स्थिति समझाइये।

2. कुंट की नली का वर्णन कीजिये। किसी ठोस या गैस में ध्वनि वेग निकालने के लिये कुंट की नली को कैसे प्रयोग करेंगे ?
3. अनुनाद (resonant) कम्पनों से क्या अभिप्राय है ? यह कम्पन वाध्य (forced) कम्पनों से किस प्रकार भिन्न होते हैं। उदाहरणों द्वारा समझाइये।
4. जब किसी स्वरित्र के हत्थे को मेज़ पर टिकाते हैं, तो क्यों ध्वनि की तीव्रता बढ़ जाती है ? क्या यह ऊर्जा के अविनाशकत्व के सिद्धान्त के प्रतिकूल है ?

अध्याय 8

संगीत ध्वनि की विशेषताएँ—संगीत-ग्राम—ध्वनि का पुनरुत्पादन

(Characteristics of a Musical Sound—Musical Scale—Reproduction of Sound)

8.1. **संगीत ध्वनि (Musical Sound)**—किसी ध्वनि के सांगीत्य (Musical) होने या न होने का निर्णय हम अपनी अनुभूति से करते हैं। कर्णप्रिय ध्वनि को संगीत ध्वनि (musical sound) कहते हैं। वांसुरी, सितार, स्वरित्र, तबला आदि से संगीत ध्वनि निकलती है। "ध्वनि" के भौतिक पक्ष पर विचार करने से पता लगता है कि उत्पादक के नियमित आवर्त्त कम्पन से संगीत गति उत्पन्न हो रही है। असांगीत्य (non-musical) ध्वनियों में भी नियमितता आ जाने से कर्णप्रिय बन जाती हैं। मेज़ पर डंडे की चोट कर्णप्रिय नहीं होती परन्तु उसकी उद्घोषिता और आवृत्ति को नियमित करने से संगीत ध्वनि बन सकती है। प्याले में लकड़ी की चोट से कर्कश ध्वनि निकलती है परन्तु नियमितता होने पर जलतरंग जैसे मधुर वाद्ययन्त्र की रचना हो जाती है।

8.2. **संगीत ध्वनि की विशेषतायें**—असांगीत्य ध्वनि को प्राय: कोलाहल कहते हैं। एक संगीत ध्वनि में तीन विशेषतायें होती हैं—

1. उद्घोषिता (Loudness) या तीव्रता (Intensity)
2. तारत्व (Pitch)
3. लक्षण (Quality)

जैसा कि प्रथम अध्याय के प्रारम्भ में संकेत किया था 'ध्वनि' के दो पक्ष हैं—(i) हमारी अनुभूति तथा (ii) समस्त भौतिक प्रक्रिया। अत: ध्वनि की इन तीनों विशेषताओं के आधार पर दोनों पक्षों का समझ लेना आवश्यक है।

1. **उद्घोषिता**—पहले पक्ष (अनुभूति) की "उद्घोषिता" के संगत दूसरे पक्ष (भौतिक प्रक्रिया) में "तीव्रता" है। तीव्र (intense) उद्वेलन से ही उद्घोषित

(loud) ध्वनि निकलती है। ध्वनि की तीव्रता ऊर्जा की उस मात्रा से नापी जाती है जो ध्वनि के प्रसरण की दिशा के अभिलम्ब रखे हुए एक वर्ग सें० मी० क्षेत्रफल से एक सेकिंड में गुज़रती है। उद्घोषिता इस बात पर निर्भर करेगी कि ऊर्जा की कितनी मात्रा एक सेकिंड में कान के पर्दे पर गिरती है।

ध्वनि की उद्घोषिता को प्रभावित करने वाली बहुत सी बातें हैं—जैसे ध्वनि की उद्घोषिता—

(i) उत्पादक से दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होती है।

(ii) उत्पादक के कम्पन आयाम के वर्ग के समानुपाती होती है।

(iii) माध्यम के घनत्व के साथ बढ़ती है।

(iv) अनुनाद उत्पन्न करने वाली वस्तुओं की निकटता से बढ़ जाती है।

उद्घोषिता वास्तव में कोलाहल और सांगीत्य ध्वनि दोनों में होती है। परन्तु कोलाहल की उद्घोषिता की ऊँचाई और उसके उतार चढ़ाव का क्रम दोनों ही अनियमित होते हैं।

2. **तारत्व**—साधारण भाषा में बालिकाओं की आवाज़ पतली और पुरुषों की आवाज़ मोटी कही जाती है। ऊँचे तारत्व (Pitch) वाली आवाज़ को पतली और नीचे तारत्व की आवाज़ को मोटी कहते हैं। तारत्व वह अनुभूति है जो ध्वनि की आवृत्ति (frequency) से सम्बन्धित है। आवृत्ति के साथ तारत्व भी बढ़ता जाता है।

एक दांतेदार पहिये पर स्पात की पत्ती दबाइये। पहिये के धीरे-धीरे घुमाने से तो खट-खट की कर्कश ध्वनि निकालेगी। परिभ्रमण की चाल बढ़ाते जाइये। आप देखेंगे कि जैसे-जैसे पहिये की चाल बढ़ती जाती है ध्वनि तीखी और पतली होती जाती है। अर्थात् आवृत्ति बढ़ जाने से तारत्व ऊँचा हो जाता है।

3. **लक्षण (Quality)**—यह ध्वनि की वह विशेषता है जिससे एक ही उद्-घोषिता और तारत्व की संगीत ध्वनियाँ भी अलग-अलग पहचानी जा सकती है। गाते समय हारमोनियम सितार, सारंगी और गले से एक ही तारत्व की ध्वनि निकलती है परन्तु यह स्पष्टतया पहचाना जा सकता है कि कौन सी ध्वनि किस यंत्र की है। इन ध्वनियों का विश्लेषण (analysis) करने से ज्ञात होगा कि सब ध्वनियों में मौलिक आवृत्ति (fundamental frequency) समान है परन्तु अन्य उच्चतर प्रसंवादियों की संख्या और आपेक्षिक तीव्रता भिन्न-भिन्न है।

मौलिक आवृत्ति से तो ध्वनि का तारत्व निश्चित होता है और उपस्थित उच्चतर प्रसंवादियों की संख्या व आपेक्षिक तीव्रता से ध्वनि का लक्षण।

जब कि हमारी आँखें विभिन्न रंगों (वर्णों) के प्रकाश का संयुक्त प्रभाव प्रेक्षित करती हैं हमारे कान यौगिक ध्वनि को विश्लिष्ट करके अनुभूति प्राप्त करते हैं। दो

ध्वनियों की उद्घोषिता में बहुत थोड़े से अन्तर का कान पता लगा सकते हैं। ध्वनि विश्लेषण द्वारा ही हम अपने मित्रों की आवाज़ को पहचानते हैं।

8.3. **संनाद (Consonance) व असंनाद (Dissonance)**—दो असमान आवृत्तियों की ध्वनियों के एक साथ उत्पन्न होने से कर्ण प्रिय संयुक्त ध्वनि के उत्पन्न होने की घटना को संनाद (consonance) कहते हैं। और यदि संयुक्त ध्वनि कर्णप्रिय न होकर कर्कश हो तो दोनों के योग से असंनाद (dissonance) की उत्पत्ति हुई कही जाती है। पाइथागोरस (Pythogorous) ने सर्व प्रथम यह खोज की कि जब दोनों ध्वनियों की आवृत्ति छोटे पूर्णांकों के अनुपात में होती हैं जैसे 1:2, 2:3, 3:4 आदि तो प्राय: संनाद (consonance) उत्पन्न होता है। हेल्महोज़ (Helmholtz) ने असंनाद के मौलिक कारण पर प्रकाश डालते हुए कहा कि संयुक्त ध्वनि से कान के पर्दे पर उत्पन्न हुई अप्रिय थरथराहट ही इसका मुख्य कारण है।

स्वरानुपात (Musical Interval)—दो आवृत्तियों का स्वरानुपात उनके पारस्परिक अनुपात (ratio) के बराबर होता है। अत: n_2, n_1 और n_3, n_2 का स्वरानुपात क्रमश: n_2/n_1, n_3/n_2 हैं। और n_3 व n_1 का स्वरानुपात n_3/n_1 है। स्पष्टता $n_3/n_1 = n_3/n_2 \times n_2/n_1$। अर्थात् कुल स्वरानुपात (interval) मध्यवर्ती स्वरानुपातों के गुणन फल (product) के बराबर होता है; योग के बराबर नहीं। यदि $n_2/n_1 = 2$ तो n_1 और n_2 के बीच स्वरानुपात 2 हुआ। आवृत्ति n_2 आवृत्ति n_1 की द्वितीय प्रसंवादी (Harmonic) है। सांगीत्य भाषा में n_2 आवृत्ति n_1 से एक "अष्टक" (Octave) ऊँची कही जाती है।

संगीत ग्राम (Musical Scale)—मौलिक स्वर और उसके द्वितीय प्रसंवादी स्वर के बीच का स्वरानुपात सात भागों में बांटकर इन दोनों स्वरों के बीच सात अन्य कर्णप्रिय स्वरों की स्थापना की गई है। स्वरों की इस क्रमावली को ही संगीत ग्राम (Musical Scale) कहते हैं। भारतीय और पाश्चात्य प्रणाली के अनुसार इन विभिन्न स्वरों के नाम और निकटस्थ दो स्वरों का स्वरानुपात नीचे की सारिणी से स्पष्ट हो जायेंगे—

भारतीय प्रणाली	नाम	षड्ज	ऋषभ	गंधार	मध्यम	पंचम	धैवत्	निषाद	तार षड्ज
	संकेत	स	रे	ग	म	प	ध	नि	सं
पाश्चात्य प्रणाली	नाम सोल्फा	डो	रे	मी	फा	सोल	ला	सी	डो
	संकेत	C	D	E	F	G	A	B	C
पारस्परिक स्वरानुपात			9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
मूल स्वर से स्वरानुपात		1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

निकटवर्ती स्वरों का पारस्परिक स्वरानुपात तीन प्रकार का होता है–गुरुस्वर (Major tone) = 9/8 ; लघुस्वर (Minor-tone) = 10/9 ; तथा अर्धस्वर (Semi-tone) = 16/15 । इसीसे इसको "प्रमुख द्विगुरु ग्राम" (Major Diatonic Scale) कहते हैं ।

संस्कारित ग्राम (Tempered Scale)—मान लीजिये *A* और *B* दो गायक हैं जो अपने-अपने मूल (प्रथम) स्वर क्रम से 256 व 288 लेकर गाना प्रारम्भ करते हैं । तो दोनों के लिये "द्विगुरु ग्राम" (Diatonic Scale) पर अन्य ऊँचे स्वरों की आवृत्ति नीचे की भाँति होगी—

	स	रे	ग	म	प	ध	नि	सं	रें
A के स्वर	256	288	320	341·3	384	426·6	480	512	576
B के स्वर		288	324	360	384	432	480	540	576

स्पष्ट है कि *A* के स्वरों की क्रमावली *B* की क्रमावली के पूर्ण रूप से अनुरूप नहीं है । जो हारमोनियम *A* के लिये अनुकूल है यदि उसको *B* के भी अनुकूल बनाना है तो इस अष्टक में "चार" ((324, 360, 432, 540) अतिरिक्त स्वरों का समायोजन करना होगा । यही नहीं यदि कोई तीसरा गायक अन्य स्वर को मूल (प्रथम) स्वर लेकर गाना चाहे तो फिर यह यंत्र उसके लिये बेकार है जब तक कि अन्य उपयुक्त अतिरिक्त स्वर नहीं जोड़े जाते । इसका अर्थ यह हुआ कि "द्विगुरु ग्राम" (Diatonic Scale) पर ऐसा हारमोनियम बनाना प्रायः असम्भव है जो प्रत्येक गायक का साथ दे सके ।

इस कठिनाई को दूर करने के लिये इस ग्राम (Scale) को थोड़ा संशोधित करके दूसरा "संस्कारित ग्राम" (Tempered Scale) बनाया गया । प्रत्येक "अष्टक" में पाँच अतिरिक्त "विकृति स्वर" बढ़ाये गये । इस प्रकार मूल स्वर और उसके प्रसंवादी के बीच कुल ग्यारह अन्य स्वर और बारह स्वरानुपात हुए । इस नये ग्रामें में ये बारह स्वरानुपात परस्पर बराबर कर दिये गये । अतः निकटवर्ती किन्ही भी दो स्वरों का स्वरानुपात $2^{\frac{1}{12}} = 1·065946$ हुआ । इन पाँच "विक्रित" स्वरों को क्रमशः रे, ग, म, ध, नि, से व्यक्त करते हैं । स्वर के नीचे रेखा खींचकर "कोमल" (flat) और ऊपर ऊर्ध्व रेखा खींच कर संगत "तीव्र" (sharp) स्वर को व्यक्त करते हैं । कोमल और तीव्र स्वरों का तारत्व (pitch) शुद्ध स्वर की अपेक्षा क्रम से "नीचा" (low) और "ऊँचा" (high) होता है ।

नीचे की तालिका में भारतीय और पाश्चात्य प्रणाली के अनुसार संस्कारित ग्राम के समस्त स्वर दिखाये गये हैं ।

भारतीय प्रणाली	स	रे	रे	ग	ग	म	ग	प	ध	ध	नि	नि	सं
पाश्चात्य प्रणाली	C	D_f	D	E_f	E	F	F_s	G	A_f	A	B_f	B	C

अंग्रेजी की अक्षर (D, E,) के नीचे 'f' (D_f, E_f,) लिखकर कोमल (flat) और 's' (F_s) लिखकर तीव्र (sharp) स्वर का बोध कराते हैं। स्पष्ट है कि षड़ज और पंचम सदैव शुद्ध रहते हैं।

स्वाभाविक ग्राम (Natural Scale) और संस्कारित ग्राम (Tempered Scale) में विभिन्न स्वरों के मूल स्वर से स्वरानुपातों की तुलना नीचे की गई है—

स्वर संकेत	स C	रे D_f	रे D	ग E_f	ग E	म F	म F_s	प G	ध A_f	ध A	नि B_f	नि B	सं C
द्विगुरु ग्राम	1·00		1·125		1·25	1·333		1·50		1·667		1·895	2.00
संस्कारित ग्राम	1·00	1·059	1·222	1·189	1·260	1·335	1·414	1·498	1·587	1·682	1·782	1·888	2·000

और नीचे की तालिका में दोनों ग्रामों के अनुसार शुद्ध स्वरों की आवृत्तियों की तुलना है—

स्वर संकेत	स C	रे D	ग E	म F	प G	ध A	नि B	सं C
द्विगुरु ग्राम	256	288	320	341	384	427	480	512
संस्कारित ग्राम	256	287·2	322·5	339·2	383·5	430.6	483·3	512

ऊपर की दोनों तालिकाओं से प्रकट है कि संस्कारित ग्राम और स्वाभाविक ग्राम के स्वरों में केवल थोड़ा-सा ही अन्तर है।

"स्थिर स्वर" (fixed note) वाले समस्त वाद्य-यंत्र जैसे हारमोनियम, पियानो, आदि संस्कारित ग्राम पर ही आधारित हैं, परन्तु सारंगी, सितार, वायलिन, आदि पर इच्छानुसार कोई भी ग्राम (Scale) बजाया व गाया जा सकता है।

ध्वनि का पुनरोत्पादन (Reproduction of Sound)—सामान्यतः हमें ध्वनि तब सुनाई देती है, जब वह किसी वस्तु द्वारा उत्पन्न होती है, पर कभी कभी ध्वनि का एक स्थायी अभिलेख (record) बनाया जा सकता है, जिसे पुनरोत्पादित (reproduce) किया जा सकता है। ध्वनि का अभिलेख, यांत्रिक अथवा विद्युतीय उपक्रमों द्वारा किया जा सकता है।

फ़ोनोग्राफ़ (Phonograph) :—यांत्रिक रूप से अभिलेखन करने और पुनरोत्पादन करने के लिए सबसे प्रथम, 1877 में एक अमेरिकन वैज्ञानिक टॉमस एडीसन ने एक यंत्र की रचना की जिसे फ़ोनोग्राफ़ कहते हैं।

उसमें एक कीप के आकार का भोंपू होता है, जिसके नुकीले (tapering) सिरे पर एक पतली वृत्तीय माइका अथवा शीशे की झिल्ली रहती है। बाहरी धरातल की

झिल्ली के केन्द्र पर, कठोर फ़ौलाद या नीलम के रवे का एक बारीक स्टाइलस (Stylus) रहता है। इसका नुकीला सिरा मोम से रोपित एक बेलनाकार ढोल के तल को छूता हुआ चल सकता है। ढोल को एक हत्थे द्वारा समान वेग से घुमाया जा सकता है। ढोल की गति एक पेंच की तरह होती है, अर्थात् घुमाने के साथ एक समरूप रैखिक स्थानांतर होता है।

ध्वनि का अभिलेखन :—जब कोई व्यक्ति किसी भोंपू के सामने बोलता या गाता है, तो झिल्ली द्वारा ध्वनि की तरंगें संचित एवं सकेन्द्रित (concentrated) की जाती है। जब ये किरणें बन्द सिरे पर पहुँचती हैं, तो झिल्ली में कंपनों की सृष्टि करती हैं। झिल्ली के कंपनों के साथ-साथ स्टाइलस (Stylus) ऊपर नीचे चलता है और घूमनेवाले मोम से रोपित ढोल पर भिन्न-भिन्न गहराइयों के खरोंचे (grooves) बना लेता है। इस प्रकार झिल्ली के कंपनों का अभिलेखन, खरोचों के एक सर्पिलाकार पथ पर होता है, जो तीव्रता एवं जटिलता में वास्तविक ध्वनि उत्पादक के कंपनों के अनुरूप होते हैं।

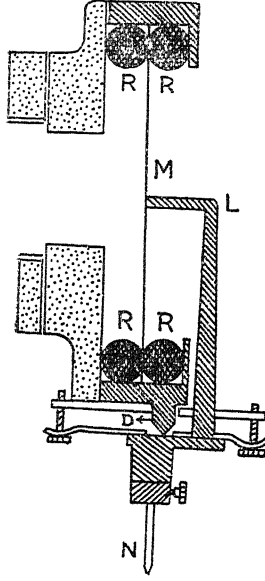
अब अभिलेखन उपकरण द्वारा ध्वनि का पुनरोत्पादन किया जाता है। इसमें नुकीले स्टाइलस (Stylus) की बजाय झिल्ली के केन्द्र पर व्यवस्थित एक गोल नीलम रहता है। इसे खरोंचे के प्रारम्भ में रखकर ढोल को घुमाया जाता है। ढोल के घूमने पर, एक खरोंचे से दूसरे में जाते समय नीलम की नोक ऊपर नीचे चलती है, और झिल्ली में कंपन उत्पन्न करती है। तब कंपनशील झिल्ली भोंपू के वायु स्तंभ में तदनुरूपी कंपन उत्पन्न करती है, जिससे मौलिक ध्वनि का पुनरुत्पादन होता है।

मोम की कोमलता के कारण इस प्रकार का पुनरोत्पादन बार-बार नहीं किया जा सकता, क्योंकि चिह्न शीघ्र ही खराब हो जाते हैं।

ग्रामोफ़ोन :—यह ध्वनि के अभिलेखन और पुनरोत्पादन की एक परिशोधित व्यवस्था है। इसमें बेलनाकार ढोल की बजाय, ध्वनि का अभिलेखन, एक ही गहराई और भिन्न-भिन्न चौड़ाई को सर्पिलाकार संकेन्द्रिक खरोंचो में व्यवस्थित चपटी गोल चकतियों पर होता है।

एक माइक्रोफ़ोन (Microphone) द्वारा, ध्वनि तरंगों से जनित दबाव का न्यूनाधिक क्रम एक स्पंदनशील विद्युत् धारा उत्पन्न करता है, जिसे रेडियो वाल्वों के द्वारा संवर्धित किया जाता है। तब, चुम्बकीय उपक्रम द्वारा धारा, एक अभिलेखन सूची को परिचालित करती है, और मोम की घूमनेवाली चकती पर एक तरंगाकार छाप बनाती है। अब चकती पर ग्रैफ़ाइट का चूर्ण बुरका जाता है और विद्युत्विश्लेषण द्वारा, तांबा, मोम की चकती पर संचित होता है। इस प्रकार तांबे की चकती पर, मोम की चकती के ध्वनि मार्ग का निगेटिव अभिलेखित होता है। अब निगेटिव को एक गर्म चकती से सटाया जाता है, और एक हाइड्रोलिक प्रेस द्वारा कई टन का दबाव डाला जाता है,

जिससे घनात्मक छाप मिलती है। गर्म चकती, मोम से अधिक कठोर द्रव्य की बनाई जाती है।

ध्वनि के पुनरोत्पादन के लिए, ध्वनि बक्स (Soundbox) का प्रयोग किया जाता है। यह लगभग दो इंच व्यास की एक अभ्रक M (Mica) की गोल झिल्ली होती है, जो एक शंक्वाकार धातु की नली के सिरे पर एक छल्ले की आकृति के घेरे के भीतर दो रबड़ के छल्लों R के बीच उत्थापित (Mounted) रहती है। झिल्ली के केन्द्र पर एक सूक्ष्म लीवर का सिरा जुड़ा रहता है, दूसरे सिरे पर एक पिन N रहती है, जो एक पेंच द्वारा उससे सम्बन्ध रहती है। जब सुई सर्पिलकार तरंगात्मक मार्ग पर चलती है, तो वह कंपन करती जाती है, और लीवर द्वारा उसकी गति झिल्ली तक संचारित होती है। जब झिल्ली अपने तल को लंबात्मक दिशा में कंपन करती है, तो शंक्वाकार नली के भीतर की वायु में उसी प्रकार के कंपन उत्पन्न होते हैं। भोंपू के कारण बहुत से आयतन की वायु कंपित हो जाती है, और काफी तीव्रता से वायु पुनरोत्पादित होती है।

चित्र 38

टाकीज़ :—किसी माइक्रोफ़ोन के सामने बोलचाल या संगीत से एक भिन्नात्मक (fluctuating) धारा, ऐसे परिपथ में उत्पन्न की जाती है, जिसमें नियन (Neon) लैम्प हो। धारा के परिवर्तनों के अनुरूप, प्रकाश की तीव्रता भी घटती बढ़ती है। इस परिवर्त्तनशील प्रकाश को, एक पतली झिर्री द्वारा किसी चलनशील फिल्म पर डाला जाता है। फिल्म को विकसित करने पर परिवर्तनशील तीव्रता के ध्वनि मार्ग का एक नेगेटिव प्राप्त किया जाता है।

ध्वनि के पुनरोत्पादन के लिए, किसी तीव्र स्रोत का प्रकाश-दंड, फिल्म के नेगेटिव ध्वनि-मार्ग से भेजा जाता है, और किसी फोटोविद्युतीय सेल पर पड़ने दिया जाता है। सेल में प्रकाश की ऊर्जा, विद्युतीय ऊर्जा में परिणत हो जाती है। इस भिन्नात्मक धारा को कई रेडियो के वाल्वों द्वारा संवधित करके अंत में एक या अधिक उच्च-कारको (loud speakers) तक पहुँचाया जाता है।

फिल्म पर ध्वनि और चित्र के मार्ग एक दूसरे के बगल में रहते हैं। चित्र और ध्वनि में पूर्ण समायोजन (Synchronisation) रहता है।

सारांश

सांगीत्य ध्वनि नियमित आवर्त कम्पन से उत्पन्न होती है और कर्णप्रिय होती है।

1. उद्घोषिता 2. तारत्व और 3. लक्षण यह तीन सांगीत्य ध्वनि की विशेषताएँ हैं। ध्वनि की मूल आवृत्ति से तारत्व और उपस्थित उच्च प्रसंवादियों की संख्या व आपेक्षिक तीव्रता से लक्षण निश्चित होता है।

"प्रमुख द्विगुरु ग्राम" और "संस्कारित संगीत ग्राम" दो स्वर क्रमावलियाँ प्रायः प्रचलित हैं। पहले ग्राम में एक अष्टम में **स रे ग म प ध नि सं** ये आठ स्वर होते हैं। परन्तु संस्कारित ग्राम में इन आठों शुद्ध स्वरों के अतिरिक्त पाँच और विक्रित स्वर [**रे, ग ध, नि,** चार कोमल और **म** तीव्र] जोड़ दिये गये हैं। इस प्रकार एक अष्टक में कुल 13 स्वर और 12 स्वरानुपात हुए। इन बारहों स्वरानुपातों का मान $2^{\frac{1}{12}}$ से है।

ध्वनि के पुनरोत्पादन के लिए एडीसन ने फ़ोनोग्राफ़ का आविष्कार किया। इसका संशोधित रूप ग्रामोफ़ोन में मिलता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. संगीत-ध्वनि की क्या-क्या विशेषताएँ हैं? संगीत-ध्वनि कोलाहल से किस प्रकार भिन्न है?
2. "संगीत ग्राम" से क्या तात्पर्य है? ये कितने प्रकार के हैं? सबको भली-भाँति समझाइये।
3. "स्वरानुपात" से क्या समझते हैं? "द्विगुरु ग्राम" के अनुसार एक अष्टक में स्वरानुपात का वितरण किस प्रकार है?
4. संनाद और असंनाद किसे कहते हैं? संस्कारित संगीत ग्राम की क्यों आवश्यकता पड़ी, समझाइये।
5. शहद की मक्खी की भनभनहाट और शेर की दहाड़ में क्या अन्तर है? किसी स्वर का तारत्व किन सीमाओं के बीच हो कि शब्द सुनाई पड़े?
6. किसी तने हुए तार में अनुप्रस्थ तरंगों का वेग किन बातों पर निर्भर होता है? भिन्न-भिन्न बाजों के उसी तारत्व के स्वरों में अंतर किस बात से होता है?
7. कंपनांक का विशुद्ध निर्धारण किस प्रकार किया जा सकता है?
8. ग्रामोफ़ोन की रचना पर प्रकाश डालिए। उसके सिद्धान्त को स्पष्ट रूप से समझाइये।
9. ध्वनि का अभिलेखन किस प्रकार किया जाता है? उच्चातिकारक (loudspeaker) की क्रिया प्रणाली पर प्रकाश डालिए।

द्वितीय प्रकरण

चुम्बकत्व

(MAGNETISM)

अध्याय 1

चुम्बक के साधारण गुण—आण्विक-सिद्धान्त

(Simple Properties of Magnet—Molecular Theory)

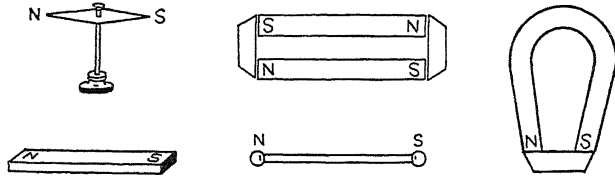
1.1. **प्राकृतिक चुम्बक—इतिहास**—बहुत वर्ष पहले एशिया माइनर के मैगनेशिया (Magnesia) नामक स्थान पर गहरे मटमैले रंग का एक पत्थर मिला जिसमें जूते की कीलों (लोहे की) को खींच लेने का एक विशेष गुण था। सर्व प्रथम प्राप्ति के स्थान मैगनेशिया को महत्त्व देने के लिये इस पत्थर को मैगनेट (Magnet) की संज्ञा दी गई। हिन्दी में इसको चुम्बक कहा गया। क्योंकि यह प्राकृतिक रूप में मिला इसलिये इसे प्राकृतिक चुम्बक (Natural Magnet) कहा गया।

चुम्बक का एक और गुण विशेष महत्त्व का है। एक पतले मज़बूत डोरे से बांध कर स्वतन्त्रता पूर्वक लटका देने से साम्य स्थिति में चुम्बक का एक सिरा सदैव उत्तर की ओर और दूसरा सिरा दक्षिण की ओर इंगित करता है। इस दैशिक गुण के कारण ही पहले, चुम्बक को "लोड स्टोन" (Lodestone—leading stone) कहते थे। इसीके आधार पर नाविकों की सहायता के लिये "कुतुबनुमा" जैसा दिक्सूचक यन्त्र बनाया गया जिसने नाविकों को महासागरों की सुदूर यात्राओं को सुरक्षित पूरा करने का साहस प्रदान किया। समुद्र के बीच जहाँ चारों ओर जल के अतिरिक्त कुछ और दिखाई नहीं देता "लोड स्टोन" (Lodestone) ने पथ प्रदर्शन किया।

रसायनिक विश्लेषण द्वारा ज्ञात हुआ कि यह पत्थर लौह (iron) और आक्सीजन का यौगिक है। इसका सूत्र Fe_3O_4 है।

1.2. **कृत्रिम चुम्बक (Artificial Magnet)**—प्राकृतिक चुम्बक आकृति में विषम व बेडौल और शक्ति में निर्बल होने से व्यवहारिक कार्यों में भली प्रकार प्रयुक्त नहीं हो सकता। अतः विभिन्न रीतियों से वांछित आकृति और शक्ति के कृत्रिम (Artificial) चुम्बक प्रयोगशाला में बनाये जाने लगे। बाह्य ज्यामितीय आकृति (External Geometrical Shape) के अनुसार कृत्रिम चुम्बक भी कई प्रकार के होते हैं। जैसे—

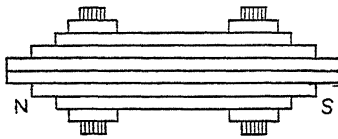
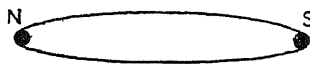
(i) **आयताकार छड़ चुम्बक (Rectangular Bar Magnet)**—आयताकार लोहे या स्पात की छड़ को कृत्रिम ढंग से चुम्बकीय गुण प्रदान करने से बनता है। चुम्बक के बीच में डोरे से बांध कर स्वतन्त्रता पूर्वक लटका देने से स्थिर अवस्था में इस छड़ का एक सिरा सदैव उत्तर दिशा में और दूसरा दक्षिण दिशा में रहता है। उत्तर की ओर इशारा करने वाला सिरा उत्तरी ध्रुव (North Pole) और दक्षिण दिशा में इंगित करने वाला सिरा दक्षिणी ध्रुव (South Pole) कहलाता है।

(ii) **नाल चुम्बक (Horse-Shoe Magnet)**—इस चुम्बक की आकृति घोड़े की नाल (Horse-shoe) के अनुरूप होती है। इसके दोनों ध्रुव (उत्तरी व दक्षिणी *N,S*) बहुत पास-पास होते हैं। इससे बड़ा शक्तिशाली चुम्बकीय बल प्राप्त होता है।

चित्र 1, 2, 3, 4

चुम्बकीय सुई, आयताकार छड़ चुम्बक, गोल ध्रुव चुम्बक, नाल चुम्बक

(iii) **चुम्बकीय सुई (Magnetic Needle)**—सूच्याकार इस्पात की पत्ती को चुम्बकित करके उसके केन्द्र को एक चूल (Pivot) पर सधा देते हैं।

(iv) **गोल ध्रुव चुम्बक (Ball Ended Magnet)**—इस चुम्बक के ध्रुव गोल गेंद की तरह होते हैं। रोबिंसन (Robinson) ने इन चुम्बकों से प्रयोग किये थे। इस चुम्बक में ध्रुव की स्थिति बड़ी सरलता से ज्ञात हो जाती है। चुम्बक को काफी लम्बा बनाकर दूसरे ध्रुव का प्रभाव नगण्य कर सकते हैं।

(v) **पटल रचित (Laminated) चुम्बक**—इस्पात की पतली पतली पत्तियों को प्रथक प्रथक चुम्बकित करके एक साथ बांध दिया जाता है ताकि सबके समान ध्रुव (similar poles) एक ओर रहें। परिणामित चुम्बक को ही पटल रचित (Laminated) चुम्बक कहते हैं। शक्तिशाली छड़ चुम्बक इसी प्रकार बनाये जाते हैं।

चित्र 5

(vi) **वेलनाकार छड़ चुम्बक (Cylindrical Bar Magnet)**—इसकी आकृति गोल बेलन की तरह होती है।

चित्र 6

1.3. चुम्बक के साधारण गुण—

(i) **आकर्षण**—लोहा, फौलाद, कोबाल्ट निकिल आदि की बनी वस्तुओं के पास चुम्बक को लाने से आकर्षण होता है। इनको चुम्बकीय (magnetic) पदार्थ कहते हैं। जिन पदार्थों के साथ कोई प्रभाव नहीं होता उन्हें अचुम्बकीय (non-magnetic) कहते हैं।

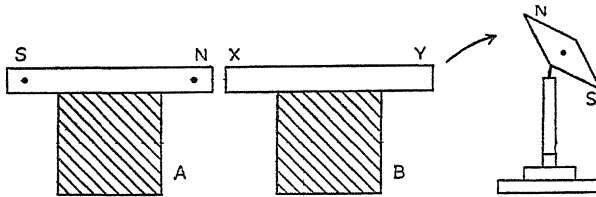
(ii) स्वतन्त्रता पूर्वक लटके हुए चुम्बक का एक सिरा (उत्तरी ध्रुव) सदैव उत्तर की ओर और दूसरा सिरा (दक्षिणी ध्रुव) सदैव दक्षिण दिशा में संकेत करता है।

(iii) एक चुम्बक का दक्षिणी ध्रुव दूसरे चुम्बक के उत्तरी ध्रुव को आकर्षित (attract) करता है परन्तु उत्तरी ध्रुव को प्रतिकर्षित (repel) करता है। इसी प्रकार उत्तरी ध्रुव दूसरे चुम्बक के उत्तरी ध्रुव को प्रतिकर्षित और दक्षिणी ध्रुव को आकर्षित करता है। इससे सिद्ध हुआ कि समान ध्रुवों में प्रतिकर्षण (repulsion) और असमान (unlike) ध्रुवों में आकर्षण होता है।

इस निष्कर्ष का समर्थन स्वतन्त्रता पूर्वक लटके हुए चुम्बक के ध्रुवों के पास अपने हाथ में दूसरे चुम्बक के उत्तरी व दक्षिणी ध्रुवों को बारी-बारी से ले जाकर कर सकते हैं।

(iv) चुम्बक का प्रत्येक ध्रुव साधारण चुम्बकीय वस्तु को जो चुम्बक नहीं है आकर्षित करता है। दूसरे, असमान ध्रुवों में भी आकर्षण होता है। अतः आकर्षण द्वारा यह निश्चित नहीं हो सकता कि दूसरी वस्तु चुम्बकित (Magnetised) है अथवा नहीं। परन्तु प्रतिकर्षण से तुरन्त यह निष्कर्ष निकलता है, दोनों ध्रुव समान हैं।

अतः प्रतिकर्षण ही चुम्बकत्व की निस्संदेह पहचान है।

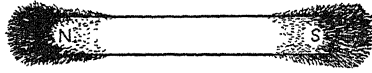
(v) **प्रेरण (Induction)**—दो बराबर ऊँचाई के लकड़ी के गुटके A व B लीजिये। B पर एक कच्चे लोहे का टुकड़ा XY और A पर एक चुम्बक रखिये। अब

चित्र 7

दोनों को पास-पास मेज़ पर इस प्रकार रखिये कि दोनों की लम्बाई एक ही रेखा में हो और चुम्बक का N ध्रुव टुकड़े की ओर हो।

आप देखेंगे कि केवल चुम्बक की उपस्थिति से ही XY में चुम्बकीय गुण आ गये हैं। एक सुई चुम्बक से B के ध्रुवों की परीक्षा कीजिये। सुई का N ध्रुव टुकड़े के दूरस्थ सिरे Y से प्रतिकर्षित होता है। अतः Y पर N ध्रुव और X पर S ध्रुव उत्पन्न होता है। चुम्बक को दूर हटा लीजिये XY का चुम्बकत्व विलुप्त हो जायेगा। सुई के दोनों ध्रुव टुकड़े (XY) के दोनों सिरों से आकर्षित होते हैं। अब चुम्बक को फिर B के पास लाइये परन्तु इस बार उसका S ध्रुव टुकड़े की ओर रहे। XY फिर चुम्बकित हो जाता है। जाँच करने से Y सिरे पर इस बार S ध्रुव उत्पन्न होता है और X सिरे पर N ध्रुव।

अतः प्रेरण द्वारा वस्तु के पास वाले सिरे (X) पर प्रेरक N (या S) ध्रुव के विपरीत S (या N) ध्रुव उत्पन्न होता है।

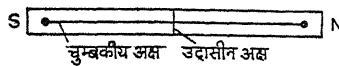
1.4. **परिभाषाएं**—

ध्रुव (Pole)—इस शब्द का प्रयोग हमने अबतक कई बार किया। परन्तु इस विषय में थोड़े पूर्व ज्ञान के न होने से ऐसा प्रतीत हो सकता है जैसे ध्रुव का अभिप्राय चुम्बक के आधे भाग से हो। यह अशुद्ध है।

चित्र 8

एक चुम्वक को लोहे के बुरादे में डालकर उठा लीजिये। बुरादा उसके शरीर से चिपक जायेगा। ध्यान पूर्वक देखने से पता चलेगा कि चिपके हुए बुरादे की मात्रा किनारों पर अधिकतम है और जैसे जैसे मध्यवर्ती भाग की ओर आते हैं मात्रा कम होती जाती है यहाँ तक कि ठीक मध्य में बिल्कुल भी बुरादा नहीं चिपकता।

इस प्रकार चुम्वकीय आकर्षण उसके समस्त शरीर पर फैला हुआ है। परन्तु चुम्वकीय क्षेत्र और बलों के मापन व गणना में चुम्बक के चुम्बकत्व को केवल दो विन्दुओं पर ही केन्द्रित मान सकते हैं। इन्हीं विन्दुओं को ध्रुव (Pole) कहते हैं। जैसा कि पहले बताया ध्रुव दो प्रकार के होते हैं—उत्तरी (North) और दक्षिणी (South)।

गुरुत्वाकर्षण बल (Gravitational force) के प्रसंग में भी किसी वस्तु का समस्त भार केवल एक विन्दु—गुरुत्वाकर्षण केन्द्र (Centre of Gravity) पर ही कार्य करता हुआ समझा जाता है। परन्तु वास्तव में वस्तु का प्रत्येक कण पृथ्वी की ओर आकर्षित होता है।

चुम्बकीय अक्ष (Magnetic Axis)—चुम्बक के दक्षिणी ध्रुव (S) को उत्तरी ध्रुव (N) से मिलाने वाली सरल रेखा है। यह एक दिष्ट (directed) रेखा है। इसकी धनात्मक दिशा S से N ध्रुव की ओर है। चुम्बकीय अक्ष का कोई भी भाग चुम्बक के शरीर से बाहर नहीं होता। एक नाल चुम्बक की चुम्बकीय अक्ष उसके शरीर से गुज़रने वाली वक्र रेखा है न कि दोनों ध्रुवों को मिलाने वाली ऋजु रेखा (Straight line)।

चित्र 9

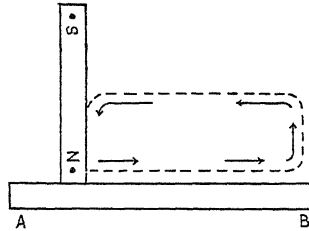
चुम्बकीय लम्बाई (Magnetic length) अथवा प्रभाविक (Effective) लम्बाई—चुम्बकीय अक्ष के साथ साथ दोनों ध्रुवों के बीच की दूरी चुम्बकीय लम्बाई कहलाती है। निश्चय ही प्रभाविक लम्बाई चुम्बक की ज्यामितीय लम्बाई से कम होती है।

उदासीन अक्ष (Neutral axis)--चुम्बकीय अक्ष के मध्य बिन्दु पर उसके अभिलम्ब (normal) खींचा हुआ तल उदासीन तल (Neutral Plane) कहलाता है। चित्र के तल में तो यह केवल एक ऋजु रेखा होगी जिसे उदासीन अक्ष कहते हैं। इस भाग में चुम्बकत्व बिल्कुल शून्य होता है और बुरादा बिल्कुल भी नहीं चिपकता। इसको चुम्बकीय निरक्ष (Magnetic Equator) भी कहते हैं।

पृथ्वी एक चुम्बक की तरह (Earth as a Magnet)--प्रयोग यह सिद्ध करते हैं कि पृथ्वी भी एक बहुत बड़े चुम्बक की भाँति व्यवहार करती है जिसका उत्तरी ध्रुव (N) भौगोलिक दक्षिण और चुम्बकीय दक्षिणी ध्रुव (S) भौगोलिक उत्तर दिशा में स्थित है। तभी तो स्वतन्त्रता पूर्वक लटके हुए चुम्बक का उत्तरी (N) ध्रुव भौगोलिक उत्तर की ओर संकेत करता है। क्योंकि उत्तर दिशा में स्थित चुम्बकीय दक्षिणी (S) ध्रुव चुम्बक के उत्तरी (N) ध्रुव को आकर्षित और दक्षिणी ध्रुव (S) को प्रतिकर्षित कर देता है। इसके साथ ही साथ दक्षिण दिशा में स्थित पृथ्वी का चुम्बकीय उत्तरी ध्रुव (N) चुम्बक के दक्षिणी ध्रुव को खींच कर अपनी ओर कर लेता है।

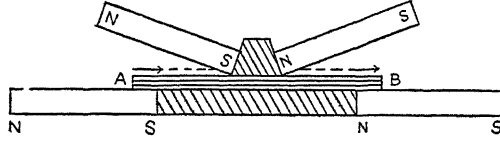
चुम्बकीय याम्योत्तर (Magnetic Meridian)--स्थिर दशा में स्वतन्त्रता पूर्वक लटके हुए छड़ चुम्बक की चुम्बकीय अक्ष से गुज़रने वाला वह उर्ध्व तल (Vertical Plane) है और पृथ्वी के चुम्बकीय उत्तरी ध्रुव (दक्षिण में) को चुम्बकीय दक्षिणी ध्रुव (भौगोलिक उत्तर) से मिलाता है। इस प्रकार चुम्बकीय याम्योत्तर भी एक निश्चित दिशा को प्रदर्शित करता है।

1.5 कृत्रिम चुम्बक बनाने की विधियाँ--

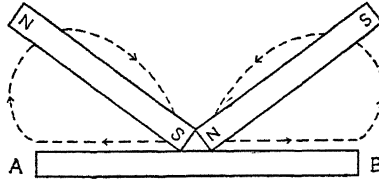
1. **एक स्पर्श-विधि (Single Touch Method)**--इस्पात की आयताकार छड़ को चित्र 10 की भाँति मेज़ पर पट लिटा दीजिये। एक छड़ चुम्बक को छड़ के किनारे उर्ध्व खड़ा कीजिये ताकि उसका उत्तरी ध्रुव छड़ को स्पर्श करे। चुम्बक को छड़ पर रगड़ते हुए दूसरे सिरे तक ले जाकर उठा लीजिये। फिर पहले सिरे पर पहली ही भाँति रखकर रगड़िये। यह क्रिया बार-बार दोहराइये। थोड़ी देर में छड़ चुम्बकित हो जायगी।

चित्र 10

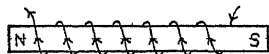
अन्त में छोड़े हुए सिरे B पर रगड़ने वाले उत्तरी ध्रुव के विपरीत दक्षिणी ध्रुव की उत्पत्ति होगी। यदि दक्षिणी ध्रुव से रगड़ते तो वहाँ उत्तरी ध्रुव बनता।

2. **द्विस्पर्श-विधि (Double Touch Method)**--इस्पात की छड़ AB के नीचे एक ही ऋजुरेखा में दो चुम्बक इस प्रकार रखिये कि दोनों के विपरीत ध्रुव अन्दर

हों। A सिरे के नीचे वाले चुम्बक का दक्षिणी (S) ध्रुव और B के नीचे वाले का उत्तरी ध्रुव (N) रहे। इनके दूसरे ध्रुव वाहर की ओर रहें।

चित्र 11

छड़ के ऊपर खड़े हुए दो चुम्बकों के विपरीत ध्रुव पास-पास सटाकर इस प्रकार रखिये कि उनके बीच में केवल एक कार्क रहे। ध्यान रहे कि B सिरे के ऊपर व नीचे (N) ध्रुव और A के ऊपर व नीचेवाले दोनों चुम्बकों के दक्षिणी (S) ध्रुव है। अब इन दोनों चुम्बकों को कार्क सहित, छड़ पर रगड़ते हुए एक सिरे से दूसरे तक बार-बार ले जाइये। छड़ चुम्बकित हो जायगी। A सिरे पर (N) उत्तरी ध्रुव और B सिरे पर दक्षिणी (S) ध्रुव उत्पन्न होगा। एक स्पर्श-विधि से बनाये गये चुम्बक की अपेक्षा इस भाँति बना हुआ, चुम्बक अधिक शक्ति शाली होता है।

3. **विभाजित स्पर्श (Divided Touch) विधि**--इस विधि और द्विस्पर्श-विधि में इतना अन्तर है कि इस बार छड़ के नीचे वाले दोनों चुम्बक और ऊपर वाले चुम्बकों के बीच का कार्क निकाल दिया जाता है। छड़ को मेज़ पर लिटा कर उसके मध्य भाग में दो चुम्बक खड़े कीजिये जिनके विपरीत ध्रुव पास हों। दोनों चुम्बकों को विपरीत दिशा में बाहर की ओर संगत सिरे तक रगड़ते हुए ले जाइये। सिरों पर चुम्बकों को उठा लीजिये और फिर मध्य में पहली भाँति रखकर क्रिया को कई बार दोहराइये। दोनों सिरों पर रगड़ने वाले संगत ध्रुवों के विपरीत ध्रुव उत्पन्न होंगे।

चित्र 12

3. **विद्युत द्वारा चुम्बक बनाना**—शक्तिशाली चुम्बक प्रायः इसी विधि से बनाये जाते हैं। वांछित आकार व आकृति के इस्पात के टुकड़े पर सूत या रेशम चढ़े हुए ताँबे के पतले तार की कई तह लपेट देते हैं परन्तु यह ध्यान रहे कि सब पर्तों के लपेटने की दिशा एक ही हो। उपयुक्त विद्युत स्रोत से स्थिर शक्ति की विद्युत् धारा कई घंटों तक प्रवाहित करने से बड़ा शक्तिशाली चुम्बक बन जाता है।

चित्र 13

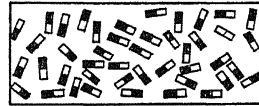
यह जानने के लिये कि किस सिरे पर कौन (N या S) ध्रुव है उस सिरे विशेष की ओर मुँह करके विद्युत धारा के बहने की दिशा पर ध्यान दीजिये। जिस सिरे पर धारा

की दिशा घड़ी की सुइयों की दिशा में (दक्षिणावृत्त) हो उस पर दक्षिणी (S) ध्रुव उत्पन्न होगा और जिस सिरे पर धारा की दिशा वामावृत्त (घड़ी की सुइयों के विपरीत) हो वहाँ पर उत्तरी ध्रुव (N) उत्पन्न होगा।

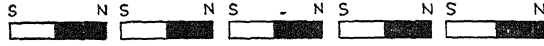
चित्र 14
बामावृत दक्षिणावृत

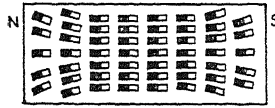
1.6. **चुम्बकत्व का आण्विक सिद्धान्त (Molecular Theory)**—चुम्बकत्व के मौलिक कारण (basic cause) के दार्शनिक पक्ष (Philosophical side) पर बहुत से मत प्रकट किये गये। वर्तमान काल में आण्विक सिद्धान्त ही सर्वमान्य है।

प्रत्येक चुम्बकीय पदार्थ उसके असंख्य अणुओं (molecules) से मिलकर बना होता है। प्रत्येक अणु एक या अधिक परमाणुओं (atoms) से मिलकर बनता है। नवीनतम सिद्धान्त के अनुसार प्रत्येक परमाणु (atom) धनात्मक (positive) और ऋणात्मक (negative) विद्युत आवेशों (electrical charges) की बराबर बराबर मात्राओं से बना होता है। परमाणु के केन्द्र पर धनात्मक आवेश होता है। और ऋणात्मक कण (एलेक्ट्रोन) केन्द्र के गिर्द चक्कर लगाते हैं। आवेश की इस गति के कारण सारा परमाणु एक चुम्बक की भाँति व्यवहार करता है जिसमें उत्तरी और दक्षिणी दोनों ध्रुव होते हैं।

इस प्रकार प्रत्येक चुम्बकीय पदार्थ असंख्य सूक्ष्म चुम्बकों का एक समुदाय होता है। जब वस्तु अचुम्बकित होती है तो ये अवयव चुम्बक अस्त-व्यस्त अवस्था में पड़े रहते हैं। यह विवेचना वेबर (Weber) ने की थी। इसी कारण से इन परमाणु-चुम्बकों को वेबर कण (Weber Elements) कहते हैं। परन्तु बाद में इविंग ने कहा कि वेबर कण अस्त-व्यस्त ही नहीं रहते वरन् कुछ कण समुदाय में इकट्ठे होकर बन्द शृंखलाएँ इस प्रकार बना लेते हैं कि एक का उत्तरी ध्रुव दूसरे के दक्षिणी ध्रुव से और दूसरे का उत्तरी ध्रुव आगे वाले कण के दक्षिणी ध्रुव से मिल जाते हैं और अन्तिम कण का उत्तरी ध्रुव पहले के दक्षिणी ध्रुव से मिल जाता है। इन शृंखलाओं को **चुम्बकीय बन्द शृंखलाएँ** (Magnetic closed chains) कह सकते हैं।

चित्र 15—**अचुम्बकीय छड़**

चुम्बकीकरण की प्रक्रिया (Process of magnetisation) में चुम्बकीकारक बल (magnetising force) के प्रभाव से वेबर कण इन बन्द शृंखलाओं को छोड़कर ऋजु रेखायें बना लेते हैं। चित्र 16 से यह बात बिल्कुल स्पष्ट हो जायगी। ऋजु रेखा के बीच में तो एक चुम्बक का उत्तरी (N) ध्रुव और पास वाले चुम्बक का दक्षिणी (S)

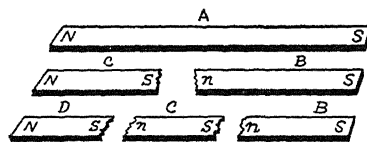
ध्रुव मिलकर दोनों के प्रभाव को विनष्ट कर लेते हैं। स्वतन्त्र ध्रुव केवल रेखा के सिरों पर ही बनते हैं। अतः एक सिरे पर उत्तरी (N) ध्रुव और दूसरे सिरे पर दक्षिणी (S)

चित्र 16—**रेखीय चुम्बक**

ध्रुव उत्पन्न होते हैं। ऐसे चुम्वक को हम रेखीय चुम्बक (Linear Magnet) कह सकते सकते हैं।

चित्र 17—छड़ **चुम्बक**

एक पूरे छड़ चुम्बक में चित्र 17 की भाँति बहुत से "रेखीय चुम्बक" एक दूसरे के समानान्तर रहते हैं। इस तथ्य को समझाने के लिये कि चुम्बकीय आकर्षण चुम्बक के सिरों के अतिरिक्त थोड़ा अन्दर तक विस्तृत रहता है किनारों पर और बाहरी तहों में स्थित रेखीय चुम्बकों में थोड़ी वक्रता दे दी गई है।

नीचे लिखी हुई बातें आण्विक सिद्धान्त का समर्थन करती हैं—

(i) उदासीन अक्ष के दोनों ओर रेखीय चुम्बकों की संख्या समान है। अतः उत्तरी और दक्षिणी दोनों ध्रुवों की प्रबलता भी समान होगी।

(ii) एक छड़ चुम्बक के मध्य से दो टुकड़े कीजिये। प्रत्येक भाग एक स्वतन्त्र और पूर्ण चुम्बक बन जाता है। दोनों में अलग-अलग उत्तरी और दक्षिणी ध्रुव होते हैं। अब इन छोटे टुकड़ों को पुनः दो-दो भागों में बांटिये और इस विभाजन क्रिया को जारी रखिये जहाँ तक विभाजन सम्भव हो। प्रत्येक बार छोटे से छोटा टुकड़ा एक पूर्ण चुम्बक होगा जिसमें उत्तरी व दक्षिणी दोनों ध्रुव होंगे।

चित्र 18—**चुम्बक का विभाजन**

इस प्रकार प्रथक्कृत अकेला चुम्बकीय ध्रुव प्राप्त करना असम्भव है।

अणु-सिद्धान्त पर यह घटना बड़ी आसानी से समझाई जा सकती है। चुम्बक की समस्त लम्बाई में रेखीय चुम्बकों की संख्या एक ही रहती है। अतः लम्बाई के किसी भी विन्दु पर काटने से किनारों पर स्वतन्त्र वेबर कणों के सिरे मिलेंगे। एक वेबर कण को आगे विभाजित करना कठिन है अतः छोटे से छोटा टुकड़ा भी वेबर कणों से बने हुए रेखीय चुम्बकों से बना होगा जिसमें उत्तरी और दक्षिणी दोनो ध्रुव होंगे।

(iii) **प्रेरण (Induction)**—जब किसी चुम्बक का उत्तरी ध्रुव किसी "चुम्बकीय पदार्थ" की वस्तु के समीप लाया जाता है तो वस्तु के अवयव वेबर कण

अपनी मध्य स्थिति में रहते हुए ही इस प्रकार घूम जाते हैं कि उनके दक्षिणी ध्रुव प्रेरक उत्तरी ध्रुव की ओर मुड़ जाँय। इससे निकटस्थ सिरे पर दक्षिणी ध्रुव उपपादित (induced) हो जाता है क्योंकि प्रेरक बल "बन्द शृंखलाओं" को तोड़ने के लिये पर्याप्त ही है अतः चुम्बक के हटा लेने से "प्रेरित" चुम्बकत्व विलुप्त हो जाता है।

(iv) विभिन्न स्पर्श विधियों से रगड़ कर चुम्बकित करने की प्रक्रिया को हम "प्रेरण" की सबसे अधिक प्रभावकारी (effective) विधि कह सकते हैं। जब चुम्बक के उत्तरी ध्रुव से छड़ के ऊपर लम्बाई की दिशा में रगड़ते हैं तो सबसे पहले ऊपर की तह वाले वेबर-कण प्रभावित होकर एक ऋजु रेखा में आते हैं। इसके बाद बार-बार रगड़ने से अन्दर के कण भी अपनी "बन्द शृंखलाओं" को तोड़कर ऋजु रेखा बना लेते हैं। और इस प्रकार एक अच्छा चुम्बक बन जाता है।

(v) **संतृप्तीकरण (Saturation)**—चुम्बकीकरण की क्रिया को काफी देर तक जारी रखने से एक-एक करके छड़ के समस्त वेबर-कण समानान्तर ऋजु रेखाओं में आ जाते हैं। अतः उत्पन्न हुए चुम्बकीय ध्रुव की शक्ति भी बढ़ते-बढ़ते एक महत्तम मान तक पहुँच जाती है। इस अवस्था को संतृप्तावस्था (Saturated State) कहते हैं।

इस दशा को हम अणु सिद्धान्त से बड़ी अच्छी प्रकार समझा सकते हैं कि जब समस्त कण बन्द शृंखलाओं को तोड़कर समानान्तर ऋजु रेखाओं में आ गये तो अब कोई भी अतिरिक्त ऋजु रेखीय चुम्बक जुड़ने को शेष नहीं रहा। अतः इस अवस्था के बाद चुम्बकीकरण की क्रिया से ध्रुव की शक्ति नहीं बढ़ सकती।

(vi) प्रेरक चुम्बक (inducing magnet) की उपस्थिति में यदि इस्पात की छड़ को हल्की हल्की चोट देते रहे तो चुम्बक के हटा लेने के बाद भी छड़ में चुम्बकत्व शेष रह जाता है। और एक चुम्बकित छड़ में बार-बार चोट लगाने से या गिरा देने से चुम्बकत्व क्षीण हो जाता है।

अणुसिद्धान्त से इस घटना को हम इस प्रकार समझ सकते हैं—उपपादक चुम्बक के प्रभाव से वेबर-कण अपनी बन्द शृंखलाओं में रहते हुए ही मध्य स्थिति पर घूम जाते हैं। परन्तु इस स्थिति में चोट लगाने से कुछ शृंखलायें टूट जाती हैं और कण स्थायी रूप से ऋजु रेखा बना लेते हैं जिससे बाद में भी चुम्बकत्व अवशिष्ट रह जाता है।

चुम्बक में एकाएक धक्का या चोट लगाने से कण ऋजु रेखायें छोड़ कर अस्त व्यस्त अवस्था में आ जाते हैं जिससे चुम्बकत्व क्षीण हो जाता है।

(vii) **क्यूरी प्रभाव (Curie effect)**—चुम्बक को गर्म करने से कणों के उष्मीय कम्पन (Thermal vibrations) बढ़ जाते हैं जिससे कण रेखीय समायोजन को छोड़ कर अस्त व्यस्त अवस्था में आने लगते हैं। चुम्बकत्व क्षीण होने लगता है। एक निश्चित ताप पर जो पदार्थ विशेष पर निर्भर करता है, रेखीय चुम्बकों

का बनना असम्भव हो जाता है और चुम्बकत्व बिल्कुल विलुप्त हो जाता है। इस ताप (temperature) को ही **क्यूरी ताप** (Curie Temperature) कहते हैं।

सारांश

चुम्बक दो प्रकार के होते हैं—प्राकृतिक और कृत्रिम। एशिया माइनर के मैग-नशिया नामक स्थान में ही सर्व प्रथम प्राकृतिक चुम्बक प्राप्त हुआ था।

कृत्रिम चुम्बक बनाने की निम्नलिखित विधियाँ हैं—

(i) एकस्पर्श-विधि, (ii) द्विस्पर्श विधि, (iii) विभाजित स्पर्श विधि, (iv) विद्युत से।

विद्युत से चुम्बक बनाते समय छड़ के ध्रुवों की पहचान के लिये छड़ के उसी किनारे की ओर देखिये। विद्युत धारा की दिशा यदि वामावृत्त है तो सिरे पर उत्तरी ध्रुव और यदि दक्षिणावृत्त है तो दक्षिणी ध्रुव होगा।

चुम्बकत्व की समस्त घटनाओं को सफलता पूर्वक और सुचारू ढंग से समझाने वाला "आणविक सिद्धान्त" (molecular theory) है। वेबर और इविंग के इस सिद्धान्त को ही सर्वमान्यता प्राप्त है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. प्राकृतिक और कृत्रिम चुम्बक से आप क्या समझते हैं? कृत्रिम चुम्बक बनाने की विभिन्न विधियों का वर्णन कीजिये?
2. उत्तरी व दक्षिणी ध्रुवों से आप क्या समझते हैं? एक ऐसी विधि का वर्णन कीजिये जिससे एक सुई इस प्रकार चुम्बकित हो जाय कि उसकी नोक पर दक्षिणी ध्रुव बने।
3. "प्रतिकर्षण ही चुम्बकत्व की वास्तविक पहचान है।" समझाइये। समान वाह्य आकृति के एक चुम्बक और अचुम्बकित इस्पात की छड़ में से आप किस प्रकार पह-चानेंगे कि कौन क्या है? आपको अन्य किसी उपकरण की सहायता नहीं लेनी है।
4. "चुम्बकत्व के आण्विक सिद्धान्त" पर एक टिप्पणी लिखिये। उसके द्वारा (i) चुम्बकीय संतृप्ति और (ii) लोहे और इस्पात के चुम्बकीय प्रभाव में अन्तर का कारण प्रकट करिए।
5. क्यूरी ताप से आप क्या समझते हैं? इस घटना को अणु सिद्धान्त से समझाइये।
6. क्या कभी किसी चुम्बक में, एक ध्रुव, दो उत्तरी ध्रुव अथवा दो से अधिक ध्रुव हो सकते हैं?
7. आपको चार रंगे हुए दंड दिए जाते हैं, जिसमें से एक चुम्बक है, दूसरा इस्पात का, तीसरा नर्म लोहे का और चौथा पीतल का दंड है। इनकी पहचान कैसे कीजिएगा?

अध्याय 2

चुम्बकीय क्षेत्र और बल रेखाएँ

(Magnetic Field and Lines of Force)

2.1. **चुम्बकीय क्षेत्र (Magnetic Field)**—चुम्बक के सब ओर वह स्थान है जो चुम्बक के चुम्बकत्व से प्रभावित होता है। इस आदर्श सैद्धान्तिक परिभाषा के अनुसार क्षेत्र अनन्त तक विस्तृत रहता है। परन्तु क्षेत्र की व्यवहारिक परिभाषा उस स्थान से की जा सकती है जिसमें चुम्बकीय प्रभाव "अनुभव" किया जा सके। इस परिभाषा के अनुसार क्षेत्र की सीमा प्रेक्षक के "अनुभव" करने की विधि और उपकरण की सुग्राहकता (sensitivity) पर निर्भर करेगी।

चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता (Intensity)—क्षेत्र के किसी विन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता (intensity) अंकों में उस बल (डाइन) के बराबर होती है जो विन्दु विशेष पर रखे हुए प्रथक्कृत (isolated) इकाई उत्तरी ध्रुव पर कार्य करती है, बशर्ते यह मान लें कि परीक्षण-ध्रुव (test pole) की उपस्थिति से क्षेत्र में कोई परिवर्तन नहीं होता। तीव्रता एक दिष्ट राशि (vector) है। इसकी दिशा परीक्षण ध्रुव पर कार्य करने वाले बल की दिशा ही होती है। चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता की इकाई (unit) ओरस्टेड (Oersted) कहलाती है। किसी विन्दु पर तीव्रता x Oersteds तब होगी जब कि संगत बल x डाइन हो।

2.2. **चुम्बकीय बल रेखाएं (Magnetic lines of Force)**—धारा 2.1 के अनुसार क्षेत्र के किसी भी विन्दु पर यदि एक प्रथक्कृत चुम्बकीय उत्तरी ध्रुव रखा जाय तो उस पर एक बल कार्य करेगा। न्यूटन के प्रथम नियम के अनुसार उस बल के कारण वह विन्दु ध्रुव क्षेत्र की तीव्रता की दिशा में चलने को प्रवृत्त होगा। परन्तु जैसे ही वह ध्रुव प्रथम विन्दु से हटकर दूसरे निकटस्थ विन्दु पर पहुँचता है बल की दिशा व परिमाण दूसरे विंदु पर क्षेत्र तीव्रता के संगत होगा। यदि ध्रुव स्वतंत्र है तो वह एक निश्चित चिकने और लगातार वक्र पर चलता चला जायेगा। इसी को बल रेखा कहते हैं।

अतः चुम्बकीय बल रेखा चुम्बकीय क्षेत्र में खींचा गया वह काल्पनिक लगातार, और चिकना वक्र है जिस पर एक स्वतन्त्र प्रथक्कृत उत्तरी ध्रुव चलेगा। इनका कोई वास्तविक अस्तित्व नहीं होता। फैरेडे (Faraday) की यह एक कल्पना और क्षेत्र की विभिन्न घटनाओं को चित्रण करने की सरल और प्रशंसनीय विधि है।

क्योंकि वक्र के प्रत्येक विन्दु पर परीक्षण ध्रुव संगत परिणामित तीव्रता की दिशा में चलेगा और उसकी दिशा वक्र पर खींची गई स्पर्श रेखा की दिशा में होगी अतः **बल रेखा**

की परिभाषा उस लगातार चिकने वक्र से कर सकते हैं जिसके किसी भी विन्दु पर खींची गई स्पर्श रेखा उस विन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता की दिशा बतलाये ।

चुम्बकीय बल रेखाओं के गुण—

(i) इनकी धनात्मक दिशा वही है जिसमें एक प्रथक्कृत उत्तरी ध्रुव गतिमान होता है ।

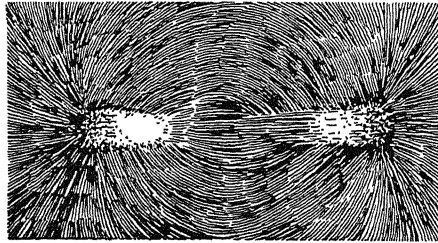
(ii) ये बन्द वक्र हैं । उत्तरी ध्रुव से चलकर दक्षिणी ध्रुव तक जाती हैं और फिर चुम्बक के शरीर के भीतर दक्षिणी ध्रुव से उत्तरी ध्रुव पर समाप्त होती है ।

(iii) लम्बाई की दिशा में तनाव के कारण खिंची हुई कमानी की तरह सिकुड़ने की प्रवृत्ति होती है । इससे विपरीत सिरों पर स्थित ध्रुव परस्पर पास आने का प्रयत्न करते हैं । विपरीत ध्रुवों के चुम्बकीय आकर्षण का एक सुन्दर चित्रण है ।

(iv) चुम्बकीय प्रतिकर्षण का चित्रण करने के लिये फैरडे ने दो समान्तर बल रेखाओं में परस्पर प्रतिकर्षण अथवा अभिलम्ब (normal) वहिर्मुख (outward) चाप (stress) की कल्पना की । इससे दो बल रेखायें एक दूसरे से दूर भागती हैं ।

(v) दो बल रेखाएँ एक दूसरे को कभी काट नहीं सकती । क्योंकि अन्यथा कटान विन्दु पर दोनों वक्रों पर खींची गई स्पर्श रेखाओं की दो दिशाओं में क्षेत्र की तीव्रता होगी जो नितान्त असंगत है ।

(vi) गणना के लिये किसी विन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता बल रेखाओं के अभिलम्ब 1 वर्ग सें० मी० के क्षेत्रफल में से गुज़रने वाली बल रेखाओं की संख्या के बराबर होती है । बल रेखाओं के अभिलम्ब किसी विन्दु पर रखे हुए 1 वर्ग सें० मी० क्षेत्र को यदि H बल रेखाएँ भेदती हैं तो उस विन्दु पर तो क्षेत्र

की तीव्रता H औरस्टेड हुई ।

(vii) शून्य चुम्बकीय क्षेत्र से कोई बलरेखा नहीं गुजरती है ।

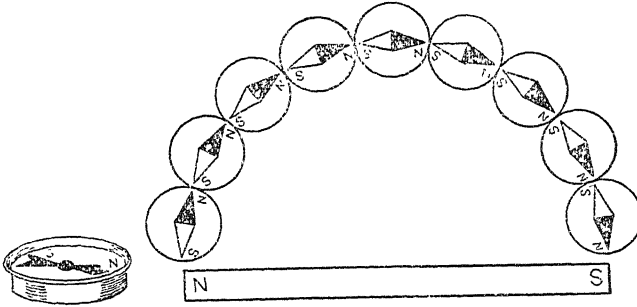
(viii) यह माना गया है कि एक उत्तरी ध्रुव से 4π बल-रेखायें निकलती हैं और एक दक्षिणी ध्रुव पर 4π बल रेखायें समाप्त होती हैं ।

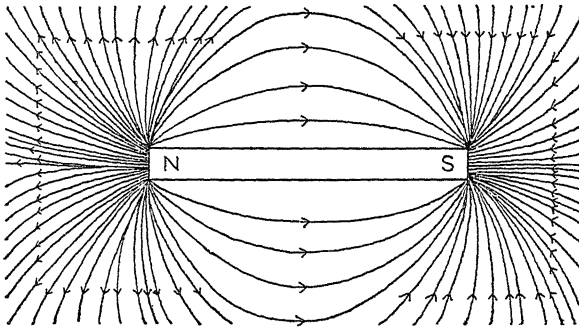
चित्र 19

2.3. बल रेखायें खींचना—

(i) **लौह चूर्ण (Iron filings) द्वारा**—ड्राइंग के मोटे काग़ज़ पर लौह चूर्ण की एक पतली सी तह जमा दीजिये । इसके नीचे एक छड़ चुम्बक रख दीजिये । अब काग़ज़ पर उँगली से धीरे-धीरे चोट दीजिये । आप देखेंगे कि लौह चूर्ण कण चित्र 19

की भाँति वक्र रेखाओं में सज जाते हैं। चुम्बक के प्रेरण (induction) से प्रत्येक कण एक स्वतन्त्र चुम्बक बन जाता है और चोट देने से क्षेत्र की तीव्रता की दिशा में मुड़कर स्थिर हो जाता है। इस प्रकार बहुत सी बल रेखायें बन जाती हैं।

(ii) **कम्पास सुई (Compass Needle) द्वारा**—समतल क्षैतिज कागज के बीच में एक छड़ चुम्बक रखिये। चुम्बक के उत्तरी ध्रुव के पास एक विन्दु लगाइये।

चित्र 20

कम्पास (चित्र 20) को इस प्रकार रखिये कि स्थिर अवस्था में उसका दक्षिणी ध्रुव विन्दु के ऊर्ध्व ऊपर हो। कम्पास के दूसरे (उत्तरी) ध्रुव की सीध में एक और विन्दु लगा दीजिये। फिर कम्पास को हटाकर इसे दूसरे बिन्दु पर पहली भाँति रखिये कि उसका दक्षिणी ध्रुव बिन्दु के ऊपर स्थिर हो जाय। उत्तरी ध्रुव की सीध में फिर एक विन्दु लगाइये और इस क्रिया को चित्र 20 की भाँति उस समय तक जारी रखिये जब तक कि कम्पास (कागज़ की सीमा या) चुम्बक के दक्षिणी ध्रुव तक न पहुँच जाय।

चित्र 21

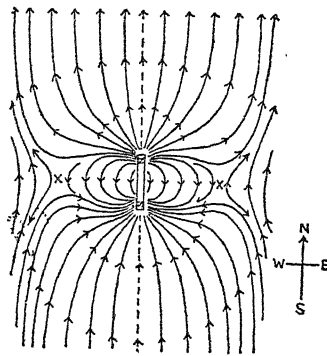
स्पष्ट है कि प्रत्येक साम्य स्थिति में कम्पास की सुई क्षेत्र की तीव्रता की दिशा बतायेगी। उसके दोनों ध्रुवों की स्थिति वाले विन्दुओं को मिलाने वाली रेखा अभीष्ट

बलरेखा की स्पर्श रेखा होगी। अतः वांछित बलरेखा ऐसी समस्त स्पर्श रेखाओं का खोल (Envelope) होगी। परन्तु क्योंकि कम्पास सुई बहुत छोटी है अतः व्यवहार में हम यह मान सकते हैं कि उसके दोनों सिरे बल रेखा पर ही स्थित हैं और सब विन्दुओं को लगातार चिकने वक्र से मिला देने से ही बल रेखा प्राप्त हो जायेगी। उसकी धनात्मक दिशा प्रदर्शित करने के लिये चुम्बक के उत्तरी ध्रुव से हटने वाली दिशा में तीर बना दीजिये।

अन्य चुम्बकीय क्षेत्रों (जैसे पृथ्वी का क्षेत्र इत्यादि) को किसी प्रकार हटा कर यदि छड़ चुम्बक की बल रेखायें खींची जाय तो कागज़ पर चित्र 21 की भाँति नक्शा बनेगा। और अकेले पृथ्वी के चुम्बकीय क्षेत्र की बल रेखायें चित्र 22 की भाँति भौगोलिक दक्षिण से उत्तर की ओर जाने वाली समान्तर ऋजु रेखाओं का एक समुदाय होगा। बल रेखायें पृथ्वी के चुम्बकीय उत्तरी ध्रुव से चुम्बकीय दक्षिणी ध्रुव की ओर जाती है।

चित्र 22

समरूप क्षेत्र (Uniform field)—जिस क्षेत्र के प्रत्येक और समस्त विन्दुओं पर तीव्रता दिशा और परिमाण (magnitude) दोनों में समान हो, समरूप क्षेत्र कहलाता है। ऐसे क्षेत्र की बल रेखायें समानान्तर सरल रेखाओं का समुदाय होता है। चित्र 22 से स्पष्ट है कि पार्थिव चुम्बकीय क्षेत्र समरूप (uniform) है।

2.4. **बल रेखाओं के नकशे (Maps)**—पृथ्वी के चुम्बकीय क्षेत्र में चुम्बक को विभिन्न स्थितियों में रखकर दोनों (पृथ्वी व चुम्बक) के संयुक्त (combined) क्षेत्र में बल रेखायें खींचेंगे।

उदासीन बिन्दु (Neutral Point)—कागज़ के तल में वह विन्दु है जहाँ पृथ्वी के चुम्बकीय क्षेत्र की क्षेत्र तीव्रता प्रायोगिक चुम्बक के क्षेत्र की तीव्रता के बराबर परन्तु दिशा में विपरीत होती है। इस विन्दु पर परिणामित क्षैतिज तीव्रता शून्य होती है। अतः इस विन्दु से कोई भी बल रेखा नहीं गुज़रती।

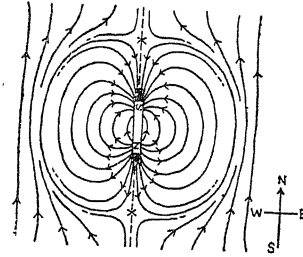
चित्र 23

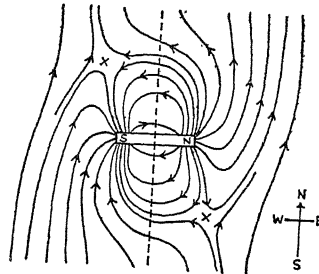
बल रेखाओं के प्रसंग में चुम्बक की तीन स्थितियाँ प्रमुख हैं—(i) चुम्बक का उत्तरी ध्रुव भौगोलिक उत्तर में रहे (चित्र 23) (ii) चुम्बक का उत्तरी ध्रुव दक्षिणी दिशा में हो (चित्र 24) तथा (iii) चुम्बक पूर्व-पश्चिम दिशा में हो (चित्र 25)।

चुम्बक की विभिन्न स्थितियों में परिणामित बल रेखाओं के स्वरूप और उदासीन विन्दुओं की आपेक्षिक स्थिति को समझने के लिये चित्र 22 की पार्थिव बल रेखाओं पर चुम्बक की स्वतंत्र बल रेखाओं (चित्र 21) की संगत स्थिति में अधिस्थापना की कल्पना कीजिये।

जब चुम्बक का N ध्रुव उत्तर की ओर रहेगा तो आप इस अधिस्थापन के द्वारा सरलता से समझ सकते हैं कि चुम्बक की अक्ष पर तो दोनों क्षेत्र एक ही दिशा में है अतः परिणामित क्षेत्र और भी तीव्र होगा। परन्तु उदासीन अक्ष पर दोनों क्षेत्रों की दिशायें विपरीत हैं अतः चुम्बक से उपयुक्त दूरी पर उदासीन अक्ष पर ही उदासीन विन्दु प्राप्त होंगे जैसा कि चित्र 23 से भी स्पष्ट है।

चुम्बक के निकटवर्ती स्थान में तो बल रेखाओं का स्वरूप चुम्बक की स्वतंत्र बल-रेखाओं (चित्र 21) जैसा है। चुम्बक से काफी दूर की बल रेखाऐं पृथ्वी के क्षेत्र की बल रेखाओं जैसी हैं (समानान्तर)। उदासीन विन्दु चारों ओर से बल रेखाओं से बने वक्र समान्तर चतुर्भुज से घिरा है।

उदासीन विन्दु पर रखी हुई छोटी सी कम्पास सुई किसी भी अनिश्चित दिशा में रुक सकती है। उदासीन अक्ष पर चुम्बक के पास से प्रारम्भ करके उदासीन विन्दु के दूसरी ओर तक यदि कम्पास को चलायें तो पहले तो सुई का N ध्रुव चुम्बक के क्षेत्र के कारण दक्षिण की ओर रहेगा। उदासीन विन्दु किसी भी दिशा में रह सकता है। परन्तु विन्दु से आगे पृथ्वी का क्षेत्र प्रबल होगा और सुई का N ध्रुव घूमकर उत्तर दिशा में आ जायेगा। यही उदासीन विन्दु की पहचान है।

चित्र 24

चित्र 24 में चुम्बक का N ध्रुव दक्षिण की ओर रखकर बल रेखायें खींची गई है। उदासीन अक्ष पर तो इस बार दोनों क्षेत्र समानान्तर और एक ही दिशा में हैं परन्तु चुम्बकीय अक्ष की दिशा में परस्पर विपरीत हैं। अतः उदासीन विन्दु चुम्बक की अक्ष पर स्थित हैं।

चित्र 25

चित्र 25 में चुम्बक का N ध्रुव पूर्व दिशा में रखकर खींची गई बल रेखाओं का प्रदर्शन है। इस बार उदासीन विन्दु चुम्बक के केन्द्र से उत्तर पश्चिम व दक्षिण पूर्व दिशा में आते हैं।

2.5. **बल रेखा (Line of force), चुम्बकत्व रेखा (Line of magnetization) तथा प्रेरण रेखा (Line of induction)—**

चुम्बकीय क्षेत्र में उसके समानान्तर किसी चुम्बकीय पदार्थ की छड़ रख देने से चुम्बकीय प्रेरण द्वारा छड़ चुम्बकित हो जाती है। छड़ द्वारा घेरे हुए स्थान में हवा की पहली वल रेखाओं के अतिरिक्त छड़ के चुम्बकत्व के कारण और भी रेखायें उत्पन्न हो जाती हैं जिनको चुम्वकत्व रेखायें (Lines of magnatization) कहते हैं। अतः छड़ के शरीर के अन्दर कुल रेखायें हवा की बल रेखाओं और छड़ की चुम्बकत्व रेखाओं के योग के बराबर होती हैं। इनको प्रेरण रेखायें (Lines of induction) कहते हैं।

चुम्बक शीलता (Permeability)—

रेखाओं के अभिलम्ब 1 वर्ग सें० मी० से गुज़रने वाली चुम्बकीय रेखाओं पर विचार कीजिये। मान लीजिये छड़ के रखने से पहले इनकी संख्या H और बाद में परिणामित प्रेरण रेखाओं की संख्या B है। तो प्रेरक (inducing) क्षेत्र की तीव्रता H औरस्टेड और छड़ के अन्दर प्रेरित (induced) क्षेत्र की तीव्रता B औरस्टेड हुई। प्रेरित क्षेत्र B और प्रेरक क्षेत्र H के अनुपात $\mu = B/H$ को छड़ के पदार्थ की चुम्बकशीलता (Permeability) कहते हैं।

चुम्बकत्व तीव्रता (Intensity of magnetisation)—ध्रुव शक्ति प्रति इकाई क्षेत्र फल चुम्बक की चुम्बकत्व तीव्रता के बराबर होती है। समान रूप से चुम्बकित चुम्बक की यदि ध्रुव शक्ति m इकाई और अनुप्रस्थ क्षेत्र फल a वर्ग सें० मी० हो तो उसकी चुम्बकत्व तीव्रता $I = \frac{m}{a}$ होगी।

चुम्बकीय प्रवृत्ति (Magnetic Susceptibility)—मान लीजिये H औरस्टेड के क्षेत्र में एक छड़ को रखने से उसमें I चुम्बकत्व तीव्रता उत्पन्न (प्रेरित) होती है। तो I और H का अनुपात $K = I/H$ पदार्थ की चुम्बकीय प्रवृत्ति कहलाती है।

चुम्बकीय क्षेत्र में रखी हुई छड़ में चुम्बकत्व रेखाओं की संख्या $4\pi I$ होती है। अतः यह स्पष्ट है कि—

$$B = H + 4\pi I$$

यहाँ पर प्रत्येक चुम्बकीय उत्तरी ध्रुव से 4π बल रेखायें उत्पन्न होती हुई मानी गई हैं।

अब $\quad B/H = 1 + 4\pi\ I/H$

अथवा $\quad \mu = 1 + 4\pi K \ldots\ldots (1)$

धारण शक्ति (Retentivity)—चुम्बकीय संतृप्तावस्था तक पहुँचा देने के बाद चुम्बकीकारक (प्रेरक) बल को हटा लेने पर अवशिष्ट चुम्बकत्व तीव्रता पदार्थ

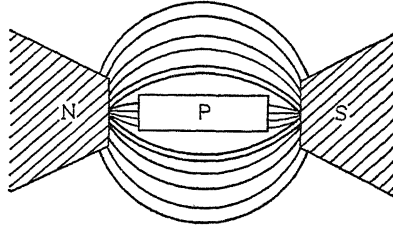
की धारण शक्ति कहलाती है। कच्चे लोहे की प्रवृत्ति इस्पात से बहुत अधिक होते हुए भी धारण शक्ति बहुत कम है।

निग्रहत्व (Coercivity)—धारण शक्ति के फलस्वरूप अवशिष्ट चुम्बकत्व को नष्ट करने के लिये विपरीत दिशा में आरोपित चुम्बकीय क्षेत्र की पर्याप्त व आवश्यक तीव्रता पदार्थ के निग्रहत्व के बराबर होती है।

2.6. लौह चुम्बकिक (Ferro-magnetic), अनुचुम्बकिक (Para-magnetic) और प्रति चुम्बकिक (Diamagnetic) पदार्थ—

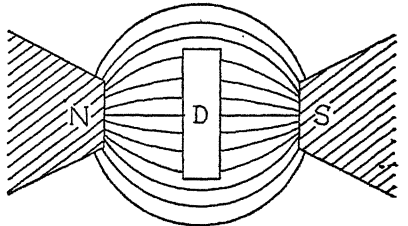
चुम्बकीय क्षेत्र में रखने पर विभिन्न पदार्थों की वस्तुओं का व्यवहार दो श्रेणियों में बाँटा जा सकता है। इसलिये चुम्बकीय क्षेत्र के प्रति प्रतिक्रिया के अनुसार पदार्थ दो प्रकार के होते हैं—

1. **अनुचुम्बकिक** और 2. **प्रति चुम्बकिक**।

अनुचुम्बकिक पदार्थ $Pt, K, Al, Fe, Ni,, Co$ की छड़ या द्रव O_2 की नली शक्तिशाली चुम्बक के ध्रुवों के बीच रखने पर क्षेत्र के समानान्तर स्थित होती है। (चित्र 26)। ये पदार्थ क्षेत्र के निर्बल तीव्रता के भाग से ऊँची तीव्रता वाले भाग की ओर चलते हैं। इनके लिये चुम्बकशीलता (μ) एक से अधिक होती है। अतः चुम्बकीय प्रवृत्ति (K) धनात्मक (शन्य से अधिक) होती है।

चित्र 26

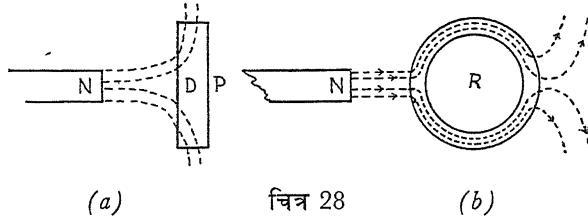
Fe, Ni, Co में यह गुण इतना अधिक होता है कि इनको एक पृथक लौहचुम्बकिक (Ferro-magnetic) नामक श्रेणी में रखा गया है।

क्यूरी ने प्रयोगों द्वारा इस सिद्धान्त का समर्थन किया कि पदार्थों का अनुचुम्बकत्व उसके परम ताप (absolute temperature) के व्युत्क्रमानुपाती (inversely proportional) होता है।

2. प्रतिचुम्बकिक पदार्थ Bi, Sb, Cu, Zn, Pb आदि की छड़ें क्षेत्र के अभिलम्ब स्थिर होती हैं। (चित्र 27)। ये पदार्थ शक्तिशाली से निर्बल क्षेत्र की ओर चलते हैं। इनके लिये चुम्बकशीलता (μ) एक से कम होती है और चुम्बकीय प्रवृत्ति ऋणात्मक (शून्य से कम) होती है।

चित्र 27

पदार्थों का प्रति-चुम्बकत्व ताप पर निर्भर नहीं करता।

चुम्बकीय पर्दे (Magnetic Screens)—क्योंकि कच्चा लोहा वायु की अपेक्षा वहुत अधिक चुम्बकशील (Permeable) है अतः चुम्बकीय बल रेखायें सदैव लोहे और वायु में से लोहे के मार्ग को ही अपनायेंगी। एक चुम्बक के N ध्रुव के समीप कच्चे लोहे की छोटी छड़ चित्र 28 (a) की भाँति रखिये। आप देखेंगे कि छड़ के दूसरी ओर छड़ के समीप D विन्दु पर चुम्बक का कोई प्रभाव नहीं है। बल रेखायें चित्र में दिखाये गये मार्ग को अपनाती हैं।

अब आप कम्पास सुई को लोहे के छल्ले से घेर कर एक शक्ति-शाली चुम्बक छल्ले के दूसरी ओर चलाइये। सुई पर कोई प्रभाव नहीं होगा। इस बार चुम्बक से चलने

(a) चित्र 28 (b)

वाली बल रेखाओं का मार्ग चित्र 28 (b) की भाँति होगा और R पर चुम्बकीय क्षेत्र शून्य होगा।

लौह चुम्बकिक पदार्थों की अत्यधिक चुम्बकशीलता के कारण उत्पन्न हुए इस प्रभाव का लाभ उठाकर किसी भी स्थान को वाह्य चुम्बकीय क्षेत्र से सुरक्षित किया जा सकता है। इस प्रयोग में काम आने वाली चुम्बकीय वस्तुओं को चुम्बकीय पर्दा (Magnetic Screen) कहते हैं।

सारांश

चुम्बकीय क्षेत्र में चलने के लिये स्वतन्त्र उत्तरी ध्रुव का मार्ग चुम्बकीय बल रेखा कहलाता है। यह वह चिकना व लगातार वक्र है जिसके प्रत्येक विन्दु पर खींची गई स्पर्श रेखा क्षेत्र की तीव्रता की दिशा बताती है।

चुम्बकीय बल रेखायें लम्बाई में खिंची कमानी की तरह सिकुड़ने की प्रवृत्ति रखती है। अतः उनके सिरों पर स्थित विपरीत ध्रुव परस्पर पास आने का प्रयत्न करते हैं। इससे चुम्बकीय आकर्षण समझा जा सकता है।

दो समानान्तर बल रेखाओं में परस्पर प्रतिकर्षण होता है। इससे चुम्बकीय प्रतिकर्षण की कल्पना की जा सकती है।

दो बल रेखायें कभी काट नहीं सकतीं।

चुम्बकीय क्षेत्र में व्यवहार के अनुसार पदार्थ दो प्रकार के होते हैं—(i) अनुचुम्बकिक (ii) प्रतिचुम्बकिक।

अनुचुम्बकिक पदार्थ निर्बल से शक्तिशाली क्षेत्र की ओर चलते हैं और प्रतिचुम्बकिक पदार्थ शक्तिशाली क्षेत्र के भाग से निर्बल क्षेत्र की ओर चलते हैं।

अनुचुम्बकत्व परम ताप के व्युत्क्रमानुपाती होता है परन्तु प्रतिचुम्बकत्व ताप से स्वतन्त्र।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. चुम्बकीय बल रेखा की परिभाषा कीजिये। इनकी सहायता से चुम्बकत्व की विभिन्न घटनाओं को समझाने के लिये इनमें कौन-कौन से गुणों की कल्पना की गई है ?
2. उदासीन बिन्दु से आप क्या समझते हैं ? एक छड़ चुम्बक के उत्तरी ध्रुव को उत्तर तथा दक्षिण की ओर रखकर खींची गई बल रेखाओं और उदासीन बिन्दु की स्थिति पर एक टिप्पणी लिखिये।
3. परिभाषा कीजिये—
   (i) बल रेखाएँ (ii) चुम्बकत्व रेखाएँ (iii) प्रेरण रेखायें (iv) चुम्बकत्व तीव्रता (v) चुम्बक-शीलता (vi) चुम्बकीय प्रवृत्ति (vii) धारण शक्ति (viii) निग्रहत्व (ix) अनुचुम्बकिक (x) प्रतिचुम्बकिक।
4. यह समझाइये कि बढ़ई के औज़ार कभी-कभी चुम्बकित क्यों हो जाते हैं। यदि आपको शक्तिशाली चुम्बकों के निकट काफ़ी देर तक काम करना है, तो आप अपनी हाथ की घड़ी की रक्षा चुम्बकीय प्रभाव से किस प्रकार करेंगे ?
5. दो उत्तरी ध्रुवों के बीच में नर्म लोहे का एक छोटा छल्ला (ring), कागज़ के तल के समानान्तर रखने से चुम्बकीय क्षेत्र पर क्या प्रभाव पड़ेगा ?
6. किसी चुम्बक के ध्रुवों का निर्धारण किस प्रकार कीजिएगा ?

अध्याय 3

चुम्बकीय मापन

(Magnetic Measurements)

3.1. **कूलम्ब के नियम (Coulomb's Laws)**—दो चुम्बकीय बिन्दु ध्रुवों के बीच कार्य करनेवाले आकर्षण अथवा प्रतिकर्षण बल से सम्बन्धित प्रयोगों के लिये कूलम्ब का नाम मुख्य है। बल एक दिष्ट राशि (Vestor) है, अत: कूलम्ब ने उसकी दिशा और परिमाण (magnitude) दोनों पर विचार किया।

बल की दिशा उस ऋजु रेखा के साथ होती है, जो बिन्दु ध्रुवों को मिलाती है। समान ध्रुवों में प्रतिकर्षण बल मिलानेवाली रेखा में बाहर की ओर और असमान ध्रुवों का आकर्षण बल अन्दर की ओर कार्य करता है।

बल के परिमाण के लिये कूलम्ब ने दो उप नियम दिये—

(i) निश्चित दूरी पर रहनेवाले ध्रुवों के बीच आकर्षण (असमान ध्रुव) अथवा प्रतिकर्षण (समान ध्रुव) का बल दोनों ध्रुवों की प्रबलता के गुणनफल का समानुपाती होता है।

यदि ध्रुवों की प्रवलता क्रमश: m, m' और दूरी r हो, तो बल

$$F \propto mm' \text{ यदि } r \text{ स्थिर रहे।}$$

यदि एक ध्रुव को दूना कर दिया जाय, तो बल भी दूना हो जायगा। और यदि एक ध्रुव को दूना तथा दूसरे को तीन गुना कर दें, तो बल $2 \times 3 = 6$ गुना हो जायगा।

(ii) निश्चित प्रवलता के दो चुम्वकीय विन्दु ध्रुवों के बीच कार्य करनेवाला बल उनकी दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है। गणित से—

$$F \propto 1/r^2 \text{ यदि } m, m' \text{ स्थिर रहें।}$$

यदि दूरी दूनी कर दी जाय, तो वल चौथाई रह जायेगा। और दूरी को 1/3 कर देने से वल नौगुना हो जायेगा।

इस नियम को **कूलम्ब का प्रतिलोम वर्ग नियम** (Inverse Square Law) कहते हैं।

अब प्रथम उपनियम से, $F \propto mm'$ यदि m, m' बदलें और r स्थिर रहे।

तथा द्वितीय उपनियमानुसार, $F \propto 1/r^2$ यदि r बदले और m, m' स्थिर रहें।

अत: दोनों को मिलाने से,

$$F \propto mm'/r^2 \text{ यदि } m, m', r \text{ सब बदलें।}$$

अथवा $$F = 1/\mu \; mm'/r^2 \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

यहाँ μ स्थिरांक है। इसका मान मध्यवर्ती माध्यम और नापने की इकाई प्रणाली (system of units) पर निर्भर करता है। इसको माध्यम की चुम्बकशीलता (permeability) कहते हैं। वायु के μ का मान लगभग 1 और शून्य (निर्वात) के लिये ठीक 1 होता है।

ध्रुव एकांक (Unit pole)—वायु अथवा शून्य में स्थित ध्रुवों के लिये,

$$F = mm'/r^2 \text{ [समीकरण (1) में } \mu = 1 \text{ रख कर]}$$

इस समीकरण में $m = m'$, $r = 1$ और $F = 1$ भी रखने से, $m^2 = 1$

अथवा $m = \pm 1$ आता है।

अत: स० ग० स० (C.G.S.) प्रणाली में चुम्बकीय ध्रुव एकांक अपने समान और प्रबलता में बरावर ध्रुव से वायु में 1 सें० मी० दूर होने पर 1 डाइन के बल से प्रतिकर्षित होता है।

उत्तरी ध्रुव को (+) चिह्न से और दक्षिणी ध्रुव को (−) चिह्न से व्यक्त करते हैं। इसी प्रकार आकर्षण और प्रतिकर्षण के बलों को क्रमश: (−) व (+) चिह्न दिये गये हैं।

चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता—परिभाषा के अनुसार क्षेत्र की तीव्रता उस बल के बराबर होती है, जो विन्दु विशेष पर रखे हुए उत्तरी ध्रुव एकांक पर कार्य करता है। अत: समीकरण (1) में यदि $m' = +1$ रखें तो F अंकों में r सें० मी० दूरी पर स्थित बिन्दु पर m के चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता H के बराबर होगा।

$$\therefore \quad H = 1/\mu \times m/r^2$$

तथा वायु में स्थित m के लिये,

$$H = m/r^2 \text{ होगा ।}$$

3.2. **चुम्बक के दोनों ध्रुव बराबर होते हैं :**—परिभाषा के अनुसार H ओरस्टेड तीव्रता वाले समरूप क्षेत्र के प्रत्येक बिन्दु पर एक उत्तरी ध्रुव एकांक पर H डाइन का वल लगेगा ; और m इकाई के ध्रुव पर mH डाइन ।

मान लीजिये एक छड़ चुम्बक के उत्तरी व दक्षिणी ध्रुवों की प्रबलता क्रमशः m, m' इकाई है । अतः इस चुम्बक को H ओरस्टेड वाले पृथ्वी के समरूप क्षेत्र में रखने से उत्तरी ध्रुव पर mH डाइन का बल उत्तर की ओर तथा दक्षिणी ध्रुव पर $m'H$ डाइन का बल दक्षिण की ओर लगेगा । परिणामतः यदि चुम्बक चलने को स्वतन्त्र हो, तो इनमें से बड़े बल की दिशा (उत्तर या दक्षिण) में चलने लगेगा ।

चित्र 29

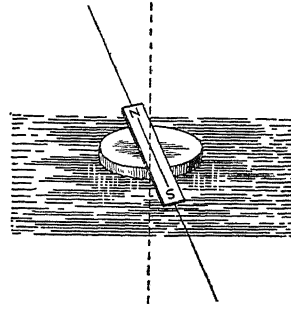
इस तथ्य की जाँच करने के लिये चुम्बक को एक कार्क पर रखकर पानी में तैरा दीजिये (चित्र 29) । चुम्बक घूम कर चुम्बकीय याम्योत्तर में आने के बाद स्थिर हो जाता है । उसमें केवल परिभ्रमण गति ही होती है, रेखीय या स्थानान्तरीय (Translatory) गति नहीं होती । चुम्बक अपने ही स्थान पर रह कर केवल तब तक घूमता है, जब तक कि वह याम्योतर में नहीं आ जाता । अतः स्पष्ट है कि उत्तर और दक्षिणी ध्रुव पर लगे हुए बल बराबर हैं । अर्थात्

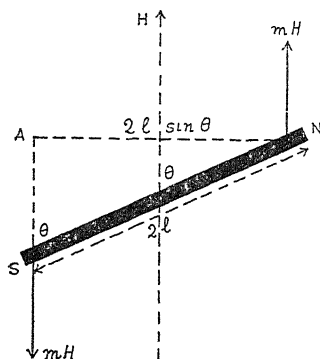
$$m\,H = m'\,H$$

$$\therefore \quad m = m'$$

अतः दोनों ध्रुवों की शक्ति समान है ।

यहाँ पर आप कह सकते हैं कि दोनों ध्रुवों पर पार्थिव क्षेत्र की तीव्रता भिन्न है और ध्रुवों की शक्ति भी असमान है, परन्तु शक्ति और तीव्रता का गुणनफल दोनों ध्रुवों के लिय बराबर है । इसीसे चुम्बक नहीं चलता । क्योंकि पृथ्वी के क्षेत्र की तीव्रता में कई सौ मील के बाद ही कुछ प्रशंसनीय परिवर्तन होता है, अतः चुम्बक द्वारा घेरे हुए स्थान पर क्षेत्र की तीव्रता को समान मान लेना न्यायसंगत ही नहीं, वरन् अनिवार्य है ।

3.3. **चुम्बकीय घूर्ण (Magnetic moment)**—प्रायः सभी चुम्बकीय मापनों में चुम्बक की प्रभाविक (effective) लम्बाई प्रत्यक्ष (directly) अथवा परोक्ष (indirectly) में प्रत्युक्त होती है। परन्तु ध्रुवों की अनिस्थित स्थिति के

कारण इस लम्बाई का मान भी अनिश्चित रहता है। अतः गास (Gauss) ने एक दूसरी चुम्बकीय राशि "चुम्बकीय घूर्ण" (Magnetic moment) की कल्पना की। चुम्बकीय घूर्ण की परिभाषा उन्होंने चुम्बक की प्रभाविक लम्बाई और ध्रुव प्रवलता के गुणनफल से की है। इस राशि का मापन अपेक्षाकृत सरल और सुविधाजनक है।

समरूप क्षेत्र में चुम्बक पर बलयुग्म (Couple on a magnet in a uniform field)—मान लीजिये $2l$ सें० मी० लम्बा और m स० ग० स० इकाई ध्रुव प्रवलता वाला एक NS चुम्बक H औरस्टेड के समरूप क्षेत्र से θ कोण बनाता है। चुम्बक के उत्तरी ध्रुव पर mH डाइन का बल क्षेत्र की दिशा में और दक्षिणी ध्रुव पर mH डाइन का बल क्षेत्र के विपरीत दिशा में कार्य करेगा। दोनों मिल कर एक बलयुग्म (Couple) बनाते हैं, जो चुम्बक को क्षेत्र की बलरेखाओं के समानान्तर स्थिर करने का प्रयत्न करेगा। इस बलयुग्म का घूर्ण,

चित्र 30

$C =$ बल $\times$ बलयुग्म की भुजा

$= mH \times AN$

$= mH \times 2l \text{ Sin } \theta$

$= 2lm \times H \text{ Sin } \theta$

$C = MH \text{ Sin } \theta$ ....(2)

यहाँ $M = 2l \times m =$ प्रभावित लम्बाई $\times$ ध्रुव प्रबलता

$=$ चुम्बक का चुम्बकीय घूर्ण (परिभाषा से)

समीकरण (2) में यदि $H = 1$ औरस्टेड, और $\theta = 90^\circ$ अथवा $\text{Sin } \theta = \text{Sin } 90^\circ = 1$ रखें तो, $C = M \times 1 \times 1 = M$ हो जाता है।

अतः चुम्बक का चुम्बकीय घूर्ण (M), उस यांत्रिक घूर्ण (mechanical couple) के बराबर होता है, जो चुम्बक को 1 औरस्टेड ($H = 1$) के समरूप क्षेत्र के अभिलम्ब ($\theta = 90^\circ$) रख सकता है।

इकाई (Unit) समीकरण $C = MH \text{ Sin } \theta$ में M के अतिरिक्त अन्य राशियों की इकाई रखने से M की इकाई निकल सकती है। अतः

डाइन $\times$ सें० मी० $= M \times$ औरस्टेड $\times 1$ [Sin θ एक अनुपात है, अतः कोई इकाई नहीं]

M=डाइन सें० मी० प्रति औरस्टेड

अतः चुम्बकीय घूर्ण की स० ग० स० इकाई डाइन सें० मी० प्रति औरस्टेड हुई ।

दिशा—चुम्बकीय घूर्ण एक दिष्ट (Vector) राशि है। इसकी धनात्मक दिशा वही है, जो चुम्बकीय अक्ष की अर्थात् चुम्बक के दक्षिणी (S) ध्रुव से उत्तरी (N) ध्रुव की ओर।

3.4. **छड़ चुम्बक के चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता**—इस प्रसंग में चुम्बक की दो स्थितियाँ विशेष उल्लेखनीय हैं—

(i) अग्राभिमुख स्थिति (End on position)

(ii) आयामाभिमुख स्थिति (Broad-side on position)

(i) **अग्राभिमुख स्थिति**—यदि विचाराधीन बिन्दु P चुम्बकीय अक्ष की सीध में स्थित होता है, तो वह चुम्बक की अपेक्षा अग्राभिमुख स्थिति में कहा जाता है। मान लीजिये $2l$ सें० मी० लम्बे और m स० ग० स० इकाई ध्रुव प्रबलता के SN चुम्बक के मध्य बिन्दु O से d सें० मी० की दूरी पर P बिन्दु है। इस बिन्दु पर चुम्बक के चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता ज्ञात करना है।

परिभाषा के अनुसार O पर रखे हुए उत्तरी ध्रुव एकांक पर कार्य करनेवाला बल तीव्रता के बराबर होगा।

अब $OP=d$ सें० मी०

परन्तु $SO=ON=l$ सें० मी०

$\therefore \quad NP=OP-ON$

$=(d-l)$ सें० मी०

और $SP=OP+SO$

$=(d+l)$ सें० मी०

चित्र 31

अतः P पर स्थित इकाई उत्तरी ध्रुव पर चुम्बक के उत्तरी ध्रुव (N) के कारण बल,

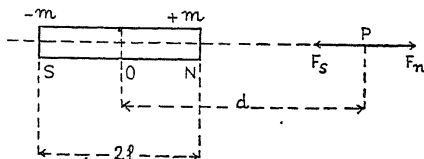
$$F_n=\frac{m\times 1}{NP^2}=\frac{m}{(d-l)^2} \text{ डाइन } \overrightarrow{NP} \text{ दिशा में}$$

और दक्षिणी ध्रुव (S) के कारण बल,

$$F_s=\frac{m\times 1}{SP^2}=\frac{m}{(d+l)^2} \text{ डाइन } \overrightarrow{PS} \text{ दिशा में}$$

अतः दोनों ध्रुवों के कारण परिणामित बल,

$$F=F_n-F_s \quad (\because F_n, F_s, \text{ की दिशायें विपरीत हैं})$$

$$=\frac{m}{(d-l)^2}-\frac{m}{(d+l)^2}=m\frac{(d+l)^2-(d-l)^2}{(d-l)^2\ (d+l)^2}$$

$$=m\frac{(d^2+l^2+2dl)-(d^2+l^2-2dl)}{(d^2-l^2)^2}=\frac{4\ mld}{(d^2-l^2)^2}$$

$$\therefore\quad F=\frac{2Md}{(d^2-l^2)^2}$$ डाइन $\overrightarrow{OP}$ दिशा में ($M=2ml$ रखकर)

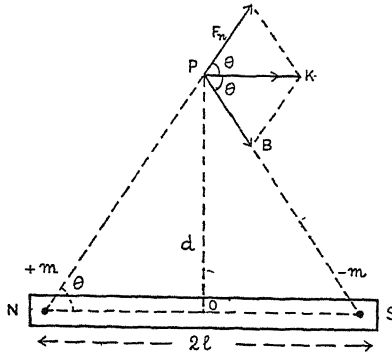
अतः P पर क्षेत्र की तीव्रता,

$$I=\frac{2Md}{(d^2-l^2)^2}$$ औरस्टेड $\overrightarrow{OP}$ दिशा में . . . . (3)

यदि तीव्रता के व्यंजक $\frac{2Md}{(d^2-l^2)^2}$ में d के स्थान पर $(-d)$ रखें तो तीव्रता भी $(-I)$ हो जाती है। अर्थात् बिन्दु P यदि O के बाईं ओर स्थित हुआ तो तीव्रता की दिशा दाईं ओर $\overrightarrow{PO}$ होगी।

अतः बिन्दु P अक्ष की सीध में चाहे कहीं भी लें (O के दाईं ओर या बाईं ओर) तीव्रता सदैव चुम्बकीय अक्ष $\overrightarrow{SN}$ की दिशा में ही होगी।

यदि चुम्बक इतना छोटा हो कि d के अनुपात में l उपेक्षणीय हो जाय, तो,

$$I=\frac{2Md}{(d^2)^2}=\frac{2M}{d^3}\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (3a)$$

(ii) **आयामाभिमुख स्थिति**—इस दिशा में बिन्दु P चुम्बकीय अक्ष के मध्य-बिन्दु O पर खींचे गये लम्ब (लम्ब अर्धक) पर d पर सें० मी० की दूरी पर है।

चित्र 32

चुम्बक की अर्द्ध लम्बाई $OS=ON=l$ सें० मी०

$\therefore$ समकोण $\triangle\ PON$ में,

$$NP^2=NO^2+OP^2$$
$$=l^2+d^2$$
$$\therefore\quad NP=\sqrt{d^2+l^2}$$

इसी प्रकार $SP=\sqrt{d^2+l^2}$

$$\text{और}\ \cos PNO=\frac{NO}{NP}=\frac{l}{\sqrt{d^2+l^2}}=\cos\theta$$

अब P पर स्थित इकाई उत्तरी ध्रुव पर चुम्बक के N ध्रुव के कारण बल,

$$F_n = \frac{m \times 1}{NP^2}$$

$= \frac{m}{(d^2+l^2)}$ डाइन $\overrightarrow{NP}$ दिशा में और चित्र 32 में PA से व्यक्त।

इसी प्रकार दक्षिणी ध्रुव (S) के कारण बल,

$$F_s = \frac{m \times 1}{SP^2}$$

$= \frac{m}{(d^2+l^2)}$ डाइन $\overrightarrow{PS}$ दिशा में और PB से व्यक्त।

स्पष्ट है कि $F_n = F_s$

अत: $PABK$ एक विषमकोण समचतुर्भुज (Rhombus) हुआ जिसका कर्ण PK कोण APB का अर्द्धक होगा।

$\because \angle APK = \angle KPB = \theta$ कहिये।

परन्तु $\angle APB = \angle PNS + \angle PSN$ (बहिष्कोण)

$\because PN = NPS$

$\therefore \angle PNS = \angle PSN$

और $\angle APK = \angle KPB = \angle PNS = \angle PSN = \theta$ हुए।

अब F_n और F_s का लब्ध बल F कर्ण PK से व्यक्त होगा

और $F^2 = F^2_n + F_s^2 + 2F_n \cdot F_s \text{ Cos } APB$

$= F_n^2 + F_n^2 + 2F_n \cdot F_n \text{ Cos } 2\theta \; [F_n = F_s]$

अथवा $F^2 = 2F_n^2 \; (1 + \text{ Cos } 2\theta)$

$= 4F_n^2 \text{ Cos}^2\theta \qquad [(1+\text{Cos}2\theta) = 2\text{Cos}^2\theta]$

$F = 2F_n \text{ Cos } \theta$

$$= 2 . \frac{m}{(d^2+l^2)} \times \frac{l}{(d^2+l^2)^{1/2}}$$

$$= \frac{2lm}{(d^2+l^2)^{3/2}}$$

या, $F = \frac{M}{(d^2+l^2)^{3/2}}$ डाइन $\overrightarrow{PK}$ दिशा में। $\qquad (M = 2lm)$

अत: P पर क्षेत्र की तीव्रता

$I = \frac{M}{(d^2+l^2)^{3/2}}$ औरस्टेड $\overrightarrow{PK}$ दिशा में। .... (4)

अब $\angle APK = \angle PNS = \theta$

$\therefore PK \parallel NS$ हुई

अर्थात् तीव्रता की दिशा चुम्बकीय अक्ष $\overrightarrow{SN}$ के समानान्तर परन्तु उसके विपरीत हुई।

यदि l का मान d के सामने नगण्य हो, तो

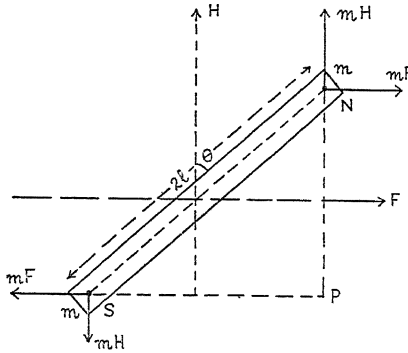
$$I=\frac{M}{(d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$I=\frac{M}{d^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4a)$$

समीकरण $(3a)$ और $(4a)$ से स्पष्ट है कि अग्राभिमुख और आयामाभिमुख दोनों स्थितियों में तीव्रता छोटे चुम्बक से दूरी की तीसरी घात (Cube) के व्युत्क्रमानुपाती होती है।

ध्यान रहे कि बल चुम्बकीय ध्रुवों के बीच दूरी की दूसरी घात के व्युत्क्रमानुपाती होता है (कूलम्ब नियम) परन्तु तीव्रता चुम्बकों के बीच दूरी की तीसरी घात के व्युत्क्रमानुपाती होता है।

समीकरण $(3a)$ और $(4a)$ से यह भी स्पष्ट है कि चुम्बक के केन्द्र से समान दूरी पर अग्राभिमुख स्थिति में आयामाभिमुख स्थिति से दूनी तीव्रता होती है।

3.5. **स्पर्शज्या नियम (Tangent Law)**—NS चुम्बक की लम्बाई $2l$ सें० मी० और ध्रुव प्रबलता m स० ग० स० इकाई है। चुम्बक पर दो सम (uniform) और परस्पर अभिलम्ब (perpendicular) क्षेत्र H व F एक साथ कार्य करते हैं। साम्य स्थिति में चुम्बक H से θ कोण बनाकर स्थिर हो जाता है।

चित्र 33

इस समय H के कारण वामाकृत प्रत्यानयन (restoring) घूर्ण F के दक्षिणावृत विक्षेपक (Deflecting) घूर्ण के बराबर होगा।

परन्तु वामावृत घूर्ण $=mH\times SP$

और दक्षिणावृत घूर्ण $=mF\times NP$

अतः संतुलन स्थिति में,

$$mF\times NP=mH\times SP$$

अथवा $=H.\frac{SP}{NP}$

$=H \tan SNP$. (समकोण $\triangle\, NPS$ से $\tan SNP=\frac{SP}{NP}$

या $F=H \tan \theta$ . . . . (5) ($\angle SNP=\theta$)

$\therefore \tan\theta=F/H$

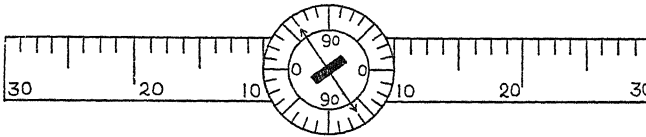
अर्थात् यदि दो (i) सम (uniform) और (ii) परस्पर समकोणिक (at right angles) क्षेत्र (iii) एक साथ चुम्बक पर कार्य करें और सन्तुल स्थिति में पहले क्षेत्र से θ कोण बनाये। तो,

$$\tan\ \theta=\frac{\text{दूसरे क्षेत्र की तीव्रता}}{\text{पहले क्षेत्र की तीव्रता}}$$

इसको स्पर्शज्या नियम (Tangent Law) कहते हैं। इस नियम के लागू होने के लिये अनिवार्य तीनों शर्तों को भली प्रकार समझ लेना चाहिये।

3.6. **विक्षेप चुम्बकत्व-मापी (Deflection Magnetometer) :**
सिद्धान्त (Principle)—यह उपकरण स्पर्शज्या नियम के सिद्धान्त पर कार्य करता है। इसमें लगी हुई चुम्बकीय सुई पर एक समक्षेत्र तो पृथ्वी के क्षेत्र का क्षैतिज अवयव H होता है और उसके अभिलम्ब दूसरा क्षेत्र प्रायोगिक चुम्बक द्वारा उत्पन्न होता है। इस उपकरण की सहायता से प्राय: दो चुम्बकों के चुम्बकीय घूर्णों की तुलना होती है।

बनावट (Construction)—चित्र 34 पर ध्यान दीजिये—

(i) एक वृत्ताकार अशांकित पैमाना 0°–90° के चार भागों में विभाजित है।

चित्र 34

(ii) पैमाने के केन्द्र पर एक छोटा सा चुम्बक (मोटी रेखा) चूल पर सधकर क्षैतिज तल में घूमने को स्वतन्त्र है। चुम्बक छोटा इसलिये होता है ताकि उसके दोनों सिरों पर प्रायोगिक चुम्बक के क्षेत्र की तीव्रता लगभग बराबर मानी जा सके। और स्पर्शज्या नियम लग सके।

(iii) सुई के अभिलम्ब एक हल्का पतला अल्यूमीनियम का लम्बा निर्देशक लगा है जो पैमाने की परिधि तक पहुँचता है। वैसे तो चुम्बक और निर्देशक के बीच 0 से 90° तक कोई भी कोण रखा जा सकता है, परन्तु 90° पर रखने तक चूल के चारों ओर संहति का समान वितरण हो जाता है, जिससे सुई के साधने में सरलता रहती है। अल्यूमीनियम, क्योंकि मज़बूत, परन्तु हल्का और चमकीला अचुम्बकीय (non-magnetic) पदार्थ है, इसीलिये इसका निर्देशक बनाया जाता है।

(iv) सुई और निर्देशक के पीछे एक समतल (plane) दर्पण लगा है। पाठ उसी समय लिया जाता है, जब कि आँख, निर्देशक और उसका बिम्ब तीनों एक ऊर्ध्व रेखा में होते हैं। इससे विस्थापनाभास (Parallex) की त्रुटि नहीं होने पाती।

(v) यह सब एक अचुम्बकीय पदार्थ (पीतल, अल्यूमीनियम) के बक्से में बन्द कर देते हैं जिसके ऊपर शीशे का ढकना लगा रहता है जो वायु के झोंकों से सुई की रक्षा करता है।

(vi) यह कम्पास 50, 50 सें० मी० लम्बी लकड़ी की दो ऋजु रेखीय भुजाओं के बीच रख देते हैं। प्रत्येक भुजा पर 50 सें० मी० तक के निशान होते हैं। परन्तु इन दोनों भुजाओं के पैमाने का शून्य भी उसी बिन्दु से शुरू होता है, जहाँ पर वृत्ताकार पैमाने का केन्द्र है और जहाँ पर सुई की चूल है।

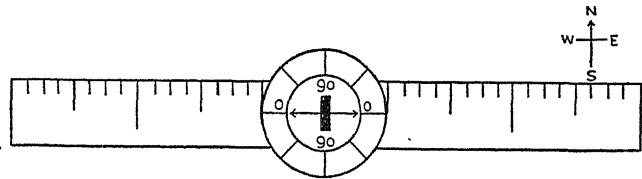
सम्भावित त्रुटियाँ और पाठन रीति--उपकरण की बनावट में निम्न त्रुटियाँ हो सकती हैं--

(i) चुम्बकी सुई की चूल वृत्ताकार पैमाने के केन्द्र पर न हो। निर्देशक के दोनों सिरों के पाठनों का मध्यमान लेने से इस त्रुटि का प्रभाव दूर हो जाता है।

(ii) चूल भुजाओं के पैमानों के शून्य पर न हो। इस त्रुटि के प्रभाव को हटाने के लिये प्रायोगिक चुम्बक को दोनों भुजाओं पर संगत स्थितियों में बारी-बारी से रखकर हर बार निर्देशक के दोनों सिरों का पाठ लेते हैं। इन चार पाठों का मध्यमान निकाल लेते हैं।

(iii) हो सकता है कि प्रायोगिक चुम्बक के दोनों ध्रुव संगत सिरों से समान दूरी पर न हों। चुम्बक को एक भुजा पर रखकर निर्देशक के दोनों सिरे पढ़ो, अब चुम्बक को घुमाया ताकि उत्तरी ध्रुव के स्थान पर दक्षिणी ध्रुव आ जाय। निर्देशक के दोनों सिरे फिर पढ़िये। इसी प्रकार दूसरी भुजा पर भी संगत स्थिति में चार पाठ लीजिये। इन आठों निरीक्षणों का मध्यमान इन सब त्रुटियों से स्वतन्त्र होगा।

3.7. **विक्षेप चुम्बकत्व मापी से प्रयोग**--विभिन्न प्रयोगों में यह उपकरण प्रायः दो मुख्य स्थितियों में ही समायोजित (set) किया जाता है।

(a) गास की $tan\ A$ स्थिति। (b) गास की $tan\ B$ स्थिति।

चित्र 35

(a) गास की Tan A स्थिति में :

(i) चुम्बकत्व मापक की चुम्बकीय सुई प्रायोगिक चुम्बक की अपेक्षा अग्राभिमुख (end on) स्थिति में होती है।

(ii) वृत्ताकार पैमाने की 0–0 रेखा भुजाओं के समानान्तर होती है।

(iii) अतः निर्देशक भी निर्विक्षिप्त स्थिति में भुजाओं के समानान्तर रहता है।

(iv) भुजायें पूर्व-पश्चिम दिशा में रहती हैं।

(v) प्रायोगिक चुम्बक की लम्बाई भुजाओं के समानान्तर रखी जाती है।

(*b*) **गास की** tan B **स्थिति में :**

(i) चुम्बकत्व मापी की सुई प्रायोगिक चुम्बक की आयामाभिमुख (Broad side on) स्थिति में रहती है।

(ii) वृत्ताकार पैमाने की 90–90 रेखा भुजाओं के समानान्तर होती है।

(iii) अतः निर्देशक निर्विक्षिप्त स्थिति में भुजाओं के अभिलम्ब रहता है।

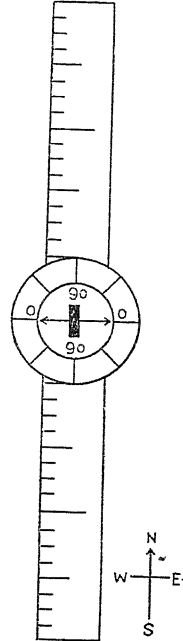
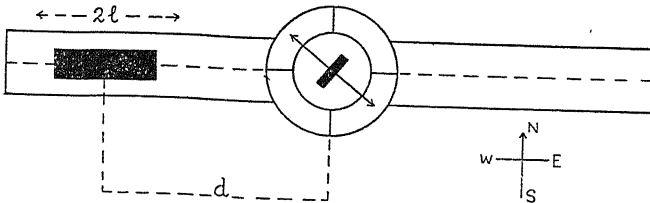
(iv) चुम्बकत्व मापी की भुजायें उत्तर-दक्षिण दिशा में रहती हैं।

(v) प्रायोगिक चुम्बक भुजाओं के अभिलम्ब रखा जाता है।

चुम्बकीय घूर्णों की तुलना M_1/M_2 विक्षेप विधि (Deflection Method) :

(a) tan A **स्थिति**—चुम्बकत्व मापी को गास की प्रथम स्थिति (tan A) में पहले बताई गई शर्तों के अनुसार समायोजित (set) कर लीजिये।

चित्र 36

मान लीजिये M_1 और M_2 केन्द्रों को चुम्बकीय घूर्णवाले चुम्बकों के क्रमशः d_1 सें० मी० और d_2 सें० मी० की दूरी (सुई की चूल से) पर रखने से निर्देशक द्वारा पढ़ा गया विक्षेप θ_1, θ_2 आता है। तो स्पर्शज्या नियम से,

चित्र 37

$F_1 = H \tan \theta_1 \quad F_2 = H \tan \theta_2$

यहाँ पर H पृथ्वी का क्षैतिज अवयव है और F_1, F_2 दोनों चुम्बकों द्वारा उत्पन्न हुए क्रमशः क्षेत्र हैं।

परन्तु स्पष्टतया F_1, F_2 चुम्बकों के अग्राभिमुख स्थिति के क्षेत्र हैं, अर्थात्

$$F_1=\frac{2M_1\, d_1}{(d_1^2-l_1^2)^2}\quad,\qquad F_2=\frac{2M_2\, d_2}{(d_2^2-l_2^2)^2}$$

l_1, l_2 चुम्बकों की अर्द्ध लम्बाइयाँ हैं।

$$\therefore\quad \frac{2M_1\, d_1}{(d_1^2-l_1^2)^2}=H\tan\theta_1,\qquad \frac{2M_2 d_2}{(d_2^2-l_2^2)^2}=H\tan\theta_2$$

या $2M_1=H.\ \frac{(d_1^2-l_1^2)^2}{d_1}\tan\theta_1$, $2M_2=H.\ \frac{(d_2^2-l_2^2)^2}{d_2}\tan\theta_2$

या भाग देने से, $\frac{M_1}{M_2}=\frac{(d_1^2-l_2^2)^2}{(d_2^2-l_2^2)^2}.\ \frac{d_2}{d_1}.\ \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2}$ .... (6)

यह तो एक सामान्य समीकरण है। अब यदि दोनों चुम्बकों को बराबर दूरी ($d_1=d_2$) पर रखकर θ_1, θ_2 विक्षेप आते हैं। तो, समीकरण (6) में $d_1=d_2=d$ रखने से,

$$M_1/M_2=\frac{(d^2-l_1^2)^2}{(d^2-l_2^2)^2}.\ \frac{\tan\theta_1}{\tan_2,}\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (6a)$$

सम्बन्ध रह जाता है।

आगे यदि दोनों चुम्बकों की लम्बाई भी बराबर हो जांय तो उनको बराबर दूरी पर रखने से, समीकरण (6) में

$d_1=d_2=d$ और $l_1=l_2$ रखकर

$\frac{M_1}{M_2}=\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2}$ हो जाता है।

(b) $\tan B$ **स्थिति**—पहले बताई गई शर्तों के अनुसार चुम्बकत्व मापी को गास की द्वितीय ($\tan B$) स्थिति में लाइये। मान लीजिये दोनों चुम्बकों के लिये क्रमशः

लम्बाई l_1, l_2 सें० मी०

चुम्बकीय घूर्ण M_1, M_2 डाइन सें०मी०/औरस्टेड

चूल से दूरी d_1, d_2 सें० मी०

मध्यमान विक्षेप θ_1, θ_2

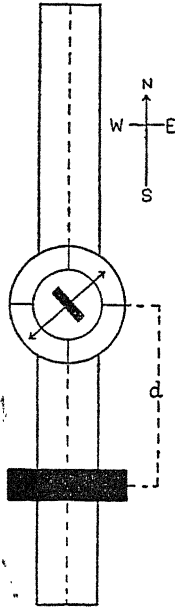
सुई पर क्षेत्र की तीव्रता F_1, F_2 औरस्टेड है।

तो, $F_1=\frac{M_1}{(d_1^2+l_1^2)^{3/2}}$, $F_2=\frac{M_2}{(d_2^2+l_2^2)^{3/2}}$

चित्र 38

परन्तु स्पर्शज्या नियम से,

$F_1=H\tan\theta_1$, $F_2=H\tan\theta_2$

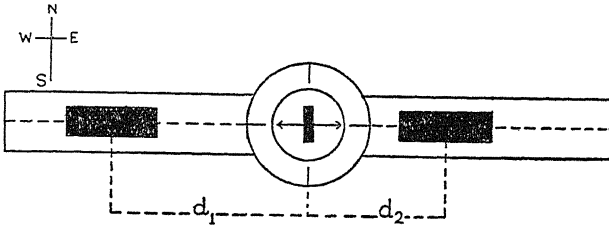
$$\because\ \frac{M_1}{(d_1^2+l_1^2)^{3/2}}=H\tan\theta_1,\ \frac{M_2}{(d_2^2+l_2^2)^{3/2}}=H\tan\theta_2$$

अतः भाग देने से,

$$\frac{M_1}{M_2}=\frac{(d_1^2+l_1^2)^{3/2}}{(d_2^2+l_2^2)^{3/2}}+\frac{\tan\ \theta_1}{\tan\ \theta_2}\quad\ldots\ldots(7)$$

अब यदि चुम्बक बराबर लम्बे हों और बराबर दूरी पर रखने से θ_1, θ_2 विक्षेप आवे तो,

$$\frac{M_1}{M_2}=\frac{\tan\ \theta_1}{\tan\ \theta_2}\quad\ldots\ldots(7a)$$

अविक्षेप (Null) विधि

(i) tan A **स्थिति**—चुम्बकत्व-मापी को इस स्थिति में पूर्ववत् समायोजित कीजिये। एक चुम्वक को पूर्वी (पश्चिमी) भुजा पर d_1 सें० मी० दूर इस प्रकार रखिये कि उसका उत्तरी (N) ध्रुव सुई की ओर रहे। सुई विक्षेपित हो जायेगी। अब पश्चिमी (पूर्वी) भुजा पर दूसरे चुम्बक को उत्तरी ध्रुव सुई की ओर रखकर आगे पीछे चला कर ऐसी स्थिति ज्ञात कीजिये कि सुई लौटकर शून्य विक्षेप पर आ जाय। दूसरे चुम्बक की संगत दूरी d_2 सें० मी० नाप लीजिये।

चित्र 39

स्पष्ट है कि इस समय दो चुम्बकों के क्षेत्र परस्पर बराबर और विपरीत हैं। अर्थात्

$$F_1=F_2$$

या

$$\frac{2M_1\ d_1}{(d_1^2-l_1^2)^2}=\frac{2M_2\ d_2}{(d_2^2-l_2^2)^2}$$

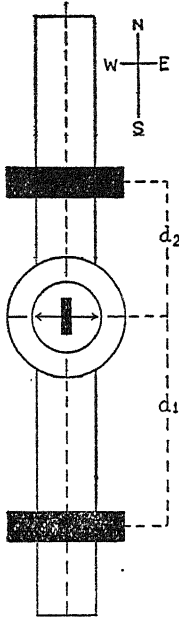
$$\therefore\quad M_1/M_2=\frac{d_2}{d_1}\times\frac{(d_1^2-l_1^2)^2}{(d_2^2-l_2^2)^2}$$

(ii) tan B **स्थिति**—चुम्बकत्व मापी की इस स्थिति में M_1 को d_1 सें० मी० दूर दक्षिणी (उत्तरी) भुजा पर रखकर M_2 को उत्तरी (दक्षिणी) भुजा पर चलाइये।

एक चुम्बक का उत्तरी ध्रुव यदि पूर्व में है, तो दूसरे का उत्तरी ध्रुव पश्चिम में होना चाहिये। जब निर्देशक अपनी (0 – 0) स्थिति में लौट आये तो दूसरे चुम्बक की दूरी d_2 सें० मी० नाप लीजिये।

इस समय,

$$\frac{M_1}{(d_1^2+l_1^2)^{3/2}} = \frac{M^2}{(d_2^2+l_2^2)^{3/2}} \text{ होगा ।}$$

$$\therefore \quad \frac{M_1}{M_2} = \frac{(d_1^2+l_1^2)^{3/2}}{(d_2^2+l_2^2)^{3/2}}$$

चित्र 40

नोट—विक्षेप नापने की अपेक्षा अविक्षेप की स्थिति को जान लेना अधिक शुद्ध (correct) होता है। अतः अविक्षेप विधि सदैव विक्षेप मापन विधि से श्रेष्ठतर होती है।

3.9. **दो स्थानों पर पृथ्वी के क्षैतिज अवयवों की तुलना** (H_1/H_2)—चुम्बकत्वमापी को दोनों स्थानों पर tan A अथवा tan B स्थिति में समायोजित करके एक ही चुम्बक को एक ही दूरी पर रख कर विक्षेप नापिये। मानलीजिये इनका मान θ_1, θ_2 है और क्षैतिज अवयव का संगत मान H_1, H_2 ओरस्टेड है। यदि चुम्बक का क्षेत्र F है, तो

$$F = H_1 \tan \theta_1$$

$$F = H_2 \tan \theta_2$$

$$\therefore \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \text{ होगा ।}$$

3.10. **दोलन चुम्बकत्वमापी (Vibration Magnetometer)—सिद्धान्त (Principle)**—चुम्बकीय क्षेत्र में एक चुम्बक के दोलन लगभग सरल आवर्त्त (Simple Harmonic) होते हैं यदि दोलन का आयाम अधिक न हो। गति का आवर्त्त काल चुम्बक के चुम्बकीय (Magnetic) और जड़त्व (Inertia) के घूर्णों तथा क्षेत्र की तीव्रता पर निर्भर करता है।

रचना (Construction)—

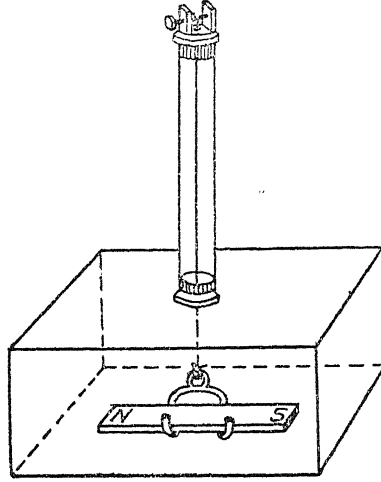
(i) लकड़ी के एक बक्स के आमने-सामने की दो दीवारें शीशे की होती हैं। जिससे बक्स के अन्दर दोलन करनेवाला चुम्बक देखा जा सके, परन्तु वायु से सुरक्षित रहे।

(ii) बक्स की छत में एक शीशे की नली ऊर्ध्व (vertical) लगी होती है। इसके ऊपरी सिरे पर लगे पेंच की सहायता से एक पीतल की पतली और छोटी छड़ को ऊपर नीचे करके अथवा घुमा कर कहीं भी कसा जा सकता है।

(iii) इस पतली छड़ के नीचे एक बिना बटे रेशम का डोरा या घोड़े का बाल बँधा रहता है। डोरे के निचले सिरे पर पीतल की एक रकाब होती है जिसमें चुम्बक को रख कर क्षैतिज तल में स्वतन्त्रता पूर्वक दोलन कराते हैं।

(iv) चुम्बक के दोलनों को देखने के लिये बक्स की छत में दो झिर्रियाँ बनी होती हैं जिनमें शीशा लगा रहता है। बक्स के पेंदे में एक समतल दर्पण लगा रहता है जिसमें चुम्बक का बिम्ब देख कर और उस पर खिंची एक ऋजु रेखा की सहायता से दोलन गिनने में शुद्धता आ जाती है।

चित्र 41

विधि—पेंदी (Bottom) में खिंची ऋजु रेखा को एक कम्पास सुई की सहायता से चुम्बकीय याम्योत्तर में लाइये। रकाब में चुम्बक के आकार की पीतल की छड़ लटकाइये। ऊपर के पेंच से छड़ को दर्पण की रेखा के समान्तर कीजिये और डोरे की सब ऐंठन छुटाइये।

अब पीतल की छड़ के स्थान पर चुम्बक रख कर दोलन कराइये। मान लीजिये, आवर्त्त काल (Periodic time) T सेकिण्ड है। तो यह सिद्ध किया जा सकता है कि, यदि आयाम कम है, तो गति सरल आवर्त्त होगी और

$$T=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}} \text{ होगा}$$

यहाँ K=दोलन समुदाय (Vibrating System) अर्थात् चुम्बक व रकाब का जड़त्व घूर्ण (moment of inertia) है। व्यवहार में रकाब को छोड़ देते हैं।

M=दोलन समुदाय का प्रभाविक (effective) चुम्बकीय घूर्ण है।

H=चुम्बक के दोलन तल (Plane of vibration) में क्षेत्र की प्रभाविक तीव्रता (instensity) है।

आयताकार चुम्बक के लिये जड़त्व घूर्ण $K=m\left(\frac{a^2+b^2}{12}\right)$ होता है।

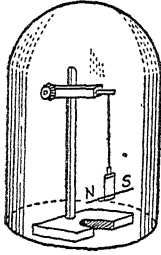
यहाँ m=संहति और a, b क्रमशः लम्बाई व चौड़ाई है।

बेलनाकार चुम्बक के लिये $K=m\left(\frac{l^2}{12}+\frac{r^2}{4}\right)$ होता है।

यहाँ l लम्बाई और r चुम्बक का अर्द्ध व्यास है।

सर्ल का चुम्बकत्व मापी (Searle's Magnetometer) (चित्र 42)—

इस चुम्बकत्व मापी में दोलन चुम्बक के स्थान पर एक छोटा-सा बेलनाकार (1·5 सें० मी०) चुम्बक होता है, जो एक पीतल के बेलन के निचले सिरे पर लगा रहता है।

चुम्बक के नीचे और उसके समानान्तर अल्यूमीनियम का लम्बा (10 सें० मी०) निर्देशक लगा होता है। जिससे चुम्बक के दोलन गिनने में आसानी होती है। पीतल के भारी बेलन के कारण दोलन समुदाय का जड़त्व घूर्ण K बहुत बढ़ जाता है। इससे आवर्त्त काल भी बढ़ जाता है और सरलता से ज्ञात किया जा सकता है। बेलन के ऊपरी हुक में बिना बटे रेशम के डोरे का एक सिरा बाँध कर उसे एक अचुम्बकीय स्टेंड से लटका देते हैं और वायु के झोंकों से रक्षा करने के लिये सब को एक शीशे के आवरण से ढक देते हैं।

चित्र 42

चुम्बकत्व मापी के उपयोग—इससे प्रायः निम्न प्रयोग किये जाते हैं—

1. दो छड़ चुम्बकों के चुम्बकीय घूर्णों की तुलना।
2. दो चुम्बकीय क्षेत्रों की तुलना।

1. **चुम्बकीय घूर्णों (Magnetic moments) की तुलना**—

(a) प्रथक विधि—दोनों चुम्बकों को प्रथक प्रथक बारी-बारी से दोलन कराते हैं और आवर्त्त काल निकाल लेते हैं। मान लीजिये दोनों चुम्बकों के लिये,

चुम्बकीय घूर्ण M_1, M_2

जड़त्व घूर्ण K_1, K_2

और आवर्त्त काल T_1, T_2 हैं।

जड़त्व घूर्ण निकालने के लिये दोनों को अलग-अलग तोल कर उनकी संहति और नाप कर लम्बाई व चौड़ाई ज्ञात कर

$$K=m\left(\frac{a^2+b^2}{12}\right)$$

सूत्र से गणना करते हैं।

अब यदि क्षेत्र की तीव्रता H औरस्टेड हो तो,

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{K_1}{M_1 H}} \qquad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{K_2}{M_2 H}}$$

भाग देने से, $$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{K_1}{M_1} \times \frac{M_2}{K_2}}$$

$$\therefore \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \times \frac{T_2}{T_1}$$

या, $$\frac{M_1}{M_2} = \frac{K_1}{K_2} \times \frac{T_2^2}{T_1^2}$$

(b) **योग-अन्तर (Sum and Difference) विधि**—प्रथक विधि से प्रयोग करने में दोनों चुम्बकों के जड़त्व घूर्णों की गणना करनी पड़ती है। परन्तु योग-अन्तर विधि में इसको बचाया जा सकता है।

दोनों चुम्बकों को एक साथ लटका कर दोलन कराते हैं। एक बार तो दोनों के समान ध्रुव एक ओर रखकर और दूसरी बार असमान ध्रुव एक ओर रखकर। दोनों बार आवर्त्त काल ज्ञात करते हैं। मान लीजिये इन दो आवर्त्त कालों का मान T_1, T_2 सें० है।

यदि दोनों चुम्बकों के चुम्बकीय और जड़त्व घूर्ण क्रमशः M_1, M_2 और K_1, K_2 हैं। जब समान ध्रुव एक ओर हैं, तो दोलन समुदाय का

प्रभाविक जड़त्व घूर्ण $K=K_1+K_2$

व प्रभाविक चुम्बकीय घूर्ण $M=M_1+M_2$ हुआ।

परन्तु जब असमान ध्रुव एक ओर रखते हैं, तो दोलन समुदाय के लिये,

प्रभाविक जड़त्व घूर्ण $K'=K_1+K_2=K$

और प्रभाविक चुम्बकीय घूर्ण $M'=M_1-M_2$ (यदि $M_1>M_2$)

अतः यदि क्षेत्र H ओरस्टेड है, तो

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}}\quad,\quad T_2=2\pi\sqrt{\frac{K'}{M'H}}$$

या $$T_1=2\pi\sqrt{\frac{K_1+K_2}{(M_1+M_2)H}}\quad,\quad T_2=2\pi\sqrt{\frac{K_1+K_2}{(M_1-M_2)H}}$$

भाग देने से,

$$\frac{T_1}{T_2}=\sqrt{\frac{M_1-M_2}{M_1+M_2}}$$

$$\therefore\ \frac{M_1+M_2}{M_1-M_2}=\frac{T_2^2}{T_1^2}$$

यदि $\frac{a}{b}=\frac{c}{d}$ हो, तो

$\frac{a+b}{a-b}=\frac{c+d}{c-d}$ होता है। [Componendo & Dividendo]

अतः $$\frac{(M_1+M_2)+(M_1-M_2)}{(M_1+M_2)-(M_1-M_2)}=\frac{T_2^2+T_1^2}{T_2^2-T_1^2}$$

या $$\frac{2M_1}{2M_2}=\frac{M_1}{M_2}=\frac{T_2^2+T_1^2}{T_2^2-T_1^2}$$ हुआ।

2. **दो चुम्बकीय क्षेत्रों की तुलना**—इस प्रयोग को करते समय एक ही चुम्बक से तीन आवर्त्त काल ज्ञात करते हैं। पहले तो अकेले पृथ्वी के क्षैतिज अवयव में दोलन

कराके आवर्त्त काल T से० ज्ञात करते हैं। फिर T_1, T_2 से० आवर्त्त काल क्रमशः उस समय के हैं जब कि पहला व दूसरा क्षेत्र F_1, F_2 बारी-बारी से H की ही दिशा में कार्य करते हैं।

यदि चुम्बक के चुम्बकीय व जड़त्व घूर्ण M, K हों, तो,

$$T=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}}$$

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{K}{M\ (F_1+H)}},\quad T_2=2\pi\sqrt{\frac{K}{M\ (F_2+H)}}$$

अतः T^2 में T_1^2, T_2^2 से भाग देकर,

$$\frac{T^2}{T_1^2}=\frac{F_1+H}{H},\quad \frac{T^2}{T_2^2}=\frac{F_2+H}{H}$$

परन्तु यदि n, n_1, n_2 क्रमशः T, T_1, T_2 की संगत आवृतियाँ (frequencies) हों तो

$$n=\frac{1}{T},\quad n_1=\frac{1}{T_1},\quad n_2=\frac{1}{T_2}$$

तथा $$\frac{n_1^2}{n_2}=\frac{1/T_1^2}{1/T^2}=\frac{T^2}{T_1^2}$$

व $$\frac{n_2^2}{n^2}=\frac{1/T_2^2}{1/T^2}=\frac{T^2}{T_2^2}$$

या $$\frac{F_1+H}{H}=\frac{n_1^2}{n^2},\quad \frac{F_2+H}{H}=\frac{n_2^2}{n^2}$$

या, $$\frac{F_1}{H}+1=\frac{n_1^2}{n^2},\quad \frac{F_2}{H}+1=\frac{n_2^2}{n^2}$$

अथवा $$\frac{F_1}{H}=\frac{n_1^2-n^2}{n^2},\quad \frac{F_2}{H}=\frac{n_2^2-n^2}{n^2}$$

∴ भाग देने से,

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{n_1^2-n^2}{n_2^2-n^2}$$

परन्तु इस सूत्र से F_1/F_2 निकालने में गणना बहुत है।

जैसा कि पहले ही देखा था—

$$\frac{T^2}{T_1^2}=\frac{F_1+H}{H},\quad \frac{T^2}{T_2^2}=\frac{F_2+H}{H}$$

$$\therefore\quad \frac{F_1}{H}=\frac{T^2}{T_1^2}-1,\quad \frac{F_2}{H}=\frac{T^2}{T_2^2}-1.$$

और भाग देकर, $\frac{F_1}{F_2}=\frac{\left(\frac{T^2}{T_1^2}-1\right)}{\left(\frac{T^2}{T_2^2}-1\right)}$ होगा।

दो स्थानों पर क्षैतिज अवयव की तुलना (H_1/H_2)—एक ही चुम्बक को दोनों स्थानों पर दोलन कराके मान लीजिये T_1, T_2 आवर्त्त काल आते हैं। यदि क्षैतिज अवयव क्रमश: H_1, H_2 हों और चुम्बक के M, K संगत घूर्ण हैं, तो,

$$T_1=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH_1}},\quad T_2=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH_2}}$$

∴ भाग देने से,

$$\frac{T_1}{T_2}=\sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$$

और $\frac{H_1}{H_2}=\frac{T_2^2}{T_1^2}$

इस प्रकार H_1, H_2 की सरलता से तुलना की जा सकती है।

3.10. M, H **का परम मान (Absolute Value)**—इसके लिये एक ही स्थान विशेष पर जिसके लिये H निकालना है, एक ही चुम्बक से (जिसका M निकालना है) विक्षेप चुम्बकत्व मापी और दोलन चुम्बकत्व मापी दोनों से प्रयोग करते हैं।

मान लीजिये tan A स्थिति में d सें० मी० की दूरी पर θ विक्षेप आता है और दोलन कराने से T से० आवर्त्त काल है।

$$\frac{2Md}{(d^2+l^2)^2}=H\tan\theta,\quad T=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}}$$

यहाँ पर विभिन्न संकेत पूर्ववत् संगत राशियों (quantities) को व्यक्त करते हैं।

$$\therefore \frac{M}{H}=\frac{(d^2+l^2)^2}{2d}\tan\theta$$

और $MH=4\pi^2\frac{K}{T^2}$

अत: $M^2=\frac{M}{H}\times MH=\frac{(d^2+l^2)^2}{2d}\tan\theta\times 4\pi^2\frac{K}{T^2}$

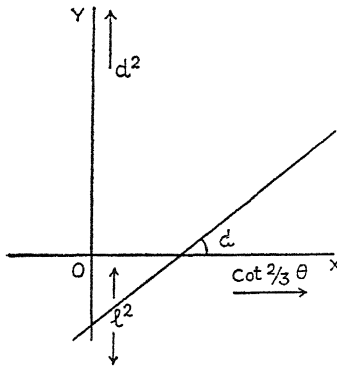
$$\therefore \qquad M=\frac{2\pi}{T}(d^2+l^2)\sqrt{\frac{K\tan\theta}{2d}}$$

और $\qquad H^2=MH\div M/H=4\pi\frac{K}{T^2}\times\frac{2d}{(d^2+l^2)^2}\cot\theta$

$$\therefore \quad H=\frac{2\pi}{T(d^2+l^2)}\sqrt{2Kd \cot \theta}$$

इसी प्रकार विक्षेप चुम्वकत्व मापी की tan B स्थिति से भी M/H का मान ज्ञात करके गणना की जा सकती है।

ग्राफ द्वारा—M, H दोनों के परम मान के व्यंजकों में एक अनिश्चित राशि l 'चुम्बक की लम्बाई' आती है। अतः इस प्रकार निकाले हुए मान अशुद्ध होंगे। परन्तु नीचे की ग्राफ विधि में M/H का मान 'l' से स्वतन्त्र होगा। साथ ही इस विधि से 'l'का भी मान ज्ञात हो सकता है।

विक्षेप चुम्बकत्व मापक की tan B स्थिति में,

चित्र 43

$$\frac{M}{(d^2+l^2)^{3/2}}=H \tan \theta$$

$$\therefore \quad (d^2+l^2)^{3/2}=M/H \cot \theta$$

$$d^2+l^2 = (M/H)^{2/3} \cot^{2/3} \theta$$

या $\quad d^2 = (M/H)^{2/3} \cot^{2/3} \theta - l^2$

इसको ऋजु रेखा के समीकरण $y=mn+C$ से तुलना करने से स्पष्ट है कि यदि Y–अक्ष पर d^2 और X–अक्ष पर $(\cot \theta)^{2/3}$ लेकर ग्राफ खींचे तो एक ऋजु रेखा (Straight line) आयेगी जिसकी प्रवणता (gradient) $m = \tan \alpha = (M/H)^{2/3}$ और Y–अक्ष की ऋणात्मक दिशा का अन्तःखण्ड (intersect) $-c=l^2$ के बराबर होगा। यहाँ α ऋजु रेखा और X–अक्ष के बीच कोण है। इस प्रकार

$$M/H = (\tan \alpha)^{3/2} \text{ होगा।}$$

परन्तु दोलन चुम्बकत्व मापी से $MH = 4\pi^2 \frac{K}{T^2}$ होता है

$$\therefore \quad M^2=MH\times M/H=4\pi^2\frac{K}{T^2}\times \tan \alpha^{3/2}$$

$$M=\frac{2\pi}{T}\sqrt{K \tan \alpha^{3/2}}$$

और $\quad H^2 = MH \div M/H =4\pi^2\frac{K}{T^2}\times \cot \alpha^{3/2}$

$$\therefore \qquad H = \frac{2\pi}{T}\sqrt{K \cot \alpha^{3/2}}$$

इसी प्रकार tan A स्थिति में,

$$\frac{2\,M\,d}{(d^2-l^2)^2} = H \tan\theta$$

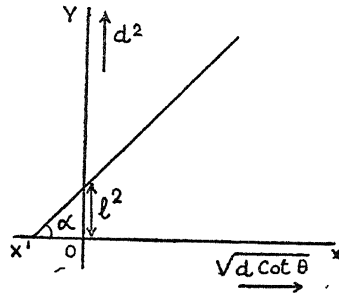
$$\therefore \qquad (d^2-l^2)^2 = 2M/H.\ d\ \cot\theta$$

$$d^2 - l^2 = \sqrt{\frac{2M}{H}} \times \sqrt{d\ \cot\ \theta}$$

या $$d^2 = \sqrt{\frac{2M}{H}} \times \sqrt{d\ \cot\ \theta} + l^2$$

अतः d^2 और $\sqrt{d\ \cot\ \theta}$ का ग्राफ भी एक सरल रेखा होगा जिसके लिये

$\tan\ \alpha = \sqrt{\frac{2M}{H}}$ और $-c = l^2$ होगा।

इस प्रकार $M/H = \frac{1}{2}\tan^2\alpha$ और दोलन चुम्बकत्व मापी से MH के मान से M,H का परम मान ज्ञात हो सकता है।

चित्र 44

3.11. कूलम्ब के उत्क्रम वर्ग नियम (Inverse Square Law) का सत्यापन (Verification)—

(1) **विक्षेप चुम्बकत्व मापी से**—M चुम्बकीय घूर्ण के एक छोटे चुम्बक को d सें० मी० दूर रखकर Tan A और Tan B दोनों स्थितियों में विक्षेप θ_A, θ_B ज्ञात कीजिये। यह तो आप जानते ही हैं कि Tan A और Tan B स्थितियों में चुम्बकत्व की सुई प्रायोगिक चुम्बक (M) की अपेक्षा क्रमशः अग्राभिमुख (end on) और आयामाभिमुख (broad side on) स्थितियों में रहती है। यदि इन स्थितियों में चुम्बक के क्षेत्र की तीव्रता F_A, F_B हो और पृथ्वी का क्षैतिज अवयव H हो। तो

स्पर्शज्या (Tangent) नियम से,

$$F_A = H\ \tan\ \theta_A\ , \quad F_B = H\ \tan\ \theta_B$$

$$\therefore \frac{F_A}{F_B} = \frac{\tan\ \theta_A}{\tan\ \theta_B} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

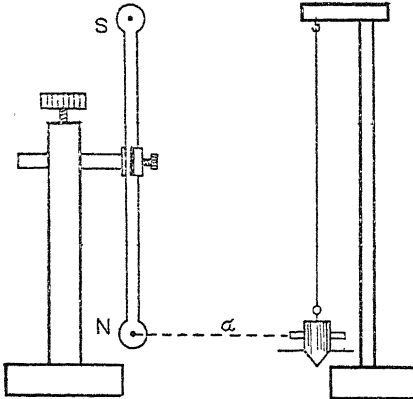
परन्तु F_A, F_B क्रमशः अग्राभिमुख और आयामाभिमुख स्थितियों के क्षेत्र हैं—अतः यदि चुम्बक छोटा है, तो

$$F_A = \frac{2M}{d^3} \quad , \quad F_B = \frac{M}{d^3}$$

$$\therefore \quad \frac{F_A}{F_B} = 2 \qquad \ldots\ldots (8i)$$

समीकरण (8) स्थिति विज्ञान के स्पर्शज्या नियम के आधार पर प्राप्त किया गया है। चुम्वकीय वलों का नियम चाहे "उत्क्रम वर्ग" (inverse square) हो या न हो, परन्तु यह सम्बन्ध सदैव पूर्णतया शुद्ध (correct) होगा। परन्तु सम्बन्ध (8i) पूर्णरूपेण उत्क्रम वर्ग नियम (inverse square law) पर ही आधारित है। अतः यदि चुम्बकीय ध्रुवों के आकर्षण और प्रतिकर्षण का नियम उत्क्रम वर्ग ही है, तो दोनों सम्वन्धों के परिणाम एक ही होने चाहिये। अर्थात्

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{\tan A}{\tan B} = 2 \qquad \text{होना चाहिये।}$$

(2) **दोलन चुम्बकत्व मापी से**—गोल ध्रुवों वाले एक काफी लम्बे रोबिन्सन चुम्वक SN को ऊर्ध्व खड़ा करके उसके उत्तरी ध्रुव (m इकाई) को दोलन चुम्बक के दक्षिण में d_1, d_2 सें० मी० दूर रखकर आवर्त्त काल T_1, T_2 निकालिये। अब चुम्बकत्व मापी को अकेले पृथ्वी के क्षैतिज अवयव H में दोलन काल T ज्ञात कीजिये। यदि रोबिन्सन चुम्बक की पहली दोनों स्थितियों में दोलन चुम्बक पर F_1, F_2 क्षेत्र हो, तो जैसा कि पहले सिद्ध कर चुके हैं—

चित्र 45

$$F_1/F_2 = \frac{\left(\frac{T^2}{T_1^2} - 1\right)}{\left(\frac{T^2}{T_2^2} - 1\right)} \quad \ldots (8ii)$$

परन्तु उत्क्रम वर्ग नियम के अनुसार,

$$F_1 = \frac{m}{d_1^2}, \quad F_2 = \frac{m}{d_2^2}$$

$$\therefore \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad \ldots (8iii)$$

अब सम्बन्ध (8ii) को प्राप्त करने के लिये केवल इस सैद्धान्तिक तथ्य का सहारा लिया गया है कि दोलन चुम्बक की गति सरल आवर्त्त है। जब तक आयाम (amplitude) कम है, यह तथ्य और इसके साथ (8ii) सम्बन्ध भी निःसंदेह सत्य हैं। परन्तु (8iii) सम्बन्ध केवल उत्क्रम वर्ग नियम की ही उत्पत्ति है। अतः यदि

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{d_2^{\,2}}{d_1^{\,2}}=\frac{(T^2/T_1^{\,2}-1)}{(T^2/T_2^{\,2}-1)}$$ हों

तो उत्क्रम वर्ग नियम सत्य है।

जैसा कि चित्र में दिखाया गया है इस प्रयोग में सर्ल का चुम्बकत्व मापी का इस्तेमाल करने से अच्छा फल (result) आता है।

(3) **उदासीन बिन्दु से**—क्षैतिज काग़ज़ पर लगभग पूर्व-पश्चिम दिशा में चुम्बक रख कर बल रेखा खींचिये और उदासीन बिन्दु P की स्थिति ज्ञात कीजिये। चुम्बक के ध्रुवों (N, S) को P से मिला दीजिये और चुम्बकीय याम्योत्तर के समानान्तर QL ऋजु रेखा खींच कर त्रिभुज PQL बनाइये।

चित्र 46

स्पष्ट है कि P पर स्थित उत्तरी ध्रुव पर तीन बल कार्य करते हैं और संतुलन में हैं। चुम्बक N के कारण F_N भुजा LP की दिशा में और S के कारण बल F_S भुजा PQ की दिशा में कार्य करता है तथा पृथ्वी का क्षैतिज अवयव H भुजा QL की दिशा में कार्य करता है। अतः PQL एक बलों का त्रिभुज (Triangle of Forces) हुआ। इसकी तीनों भुजायें उपयुक्त पैमाने पर तीनों संतुलित बलों को परिमाण और दिशा में क्रम से व्यक्त करेंगी। अर्थात्,

$$\frac{F_N}{PL}=\frac{F_S}{PQ}=\frac{H}{QL}$$ होगा।

इस सम्बन्ध की सत्यता में किसी संदेह के लिये स्थान नहीं है, क्योंकि बलों का त्रिभुज (Triangle of Forces) स्थिति विज्ञान का भली प्रकार स्थापित मौलिक नियम है।

मान लीजिये $PN=d_N$, $PS=d_S$

और $PL=l_N$, $PQ=l_S$

अब उत्क्रम वर्ग नियम के स्थान पर हम n की घात (n th power) नियम मानते हैं। अर्थात् चुम्बकीय ध्रुवों के बीच आकर्षण और विकर्षण का बल दूरी की n वी घात के समानुपाती है। गणित में $F \propto d^n$

$\therefore\ F_N \propto d_N^n,\ F_S \propto d_S^n$

$$\therefore\ \frac{F_N}{F_S}=\frac{d_N^n}{d_S^n}$$ होगा।

परन्तु बलों के त्रिभुज नियम के अनुसार,

$$\frac{F_N}{F_S}=\frac{PL}{PQ}=\frac{l_N}{l_S}.$$

दोनों सम्बन्धों की सहायता से,

$$\frac{F_N}{F_S}=\left(\frac{d_N}{d_S}\right)^n=\frac{l_N}{l_S}$$

लघु (Log) लेने से,

$$n\ log\ d_N - n\ log\ d_S = \log\ l_N - \log\ l_S$$

या, $$n=\frac{\log\ l_N-\log\ l_S}{\log\ d_N-\log d_S}.$$

प्रयोग से संगत दूरियों से गणना करके आप देखेंगे कि n का मान लगभग -2 के बराबर आता है। इससे सिद्ध हुआ कि चुम्बकीय ध्रुवों के बीच बलों का नियम उत्क्रम वर्ग नियम (inverse square law) ही है।

उदाहरण—1. दो उत्तरी ध्रुव जिनके बीच की दूरी 2 सें० मी० है, 24 डाइन के बल से प्रतिकर्षित होते हैं। इनके बीच की दूरी कितनी हो कि प्रतिकर्षण बल 3.6 डाइन हो जाय? यदि दोनों ध्रुवों में 3 सें० मी० की दूरी हो जाय तो उनके बीच प्रतिकर्षण बल कितना होगा? **[कलकत्ता यूनीवर्सिटी]**

मान लीजिये दोनों ध्रुवों की प्रबलता क्रमशः m, m' है और मध्यवर्ती माध्यम की चुम्बकशीलता (Permeability) μ है। कूलम्ब के नियम से,

$$F=\frac{1}{\mu}.\ \frac{mm'}{r^2}$$

r बीच की दूरी है।

अब $F=24$ डाइन और $r=2$ सें० मी०

$$\therefore\quad 24=\frac{1}{\mu}.\ \frac{mm'}{2^2}$$

$$\therefore\quad \frac{mm'}{\mu}=96$$

जब $F=3{\cdot}6$ है, तो दूरी कहिये r है। तो

$$3{\cdot}6=\frac{1}{\mu}.\ \frac{mm'}{r^2}$$

या, $$3{\cdot}6=\left(\frac{mm'}{\mu}\right)\frac{1}{r^2}=96\ \frac{1}{r^2}$$

$$\therefore\quad r^2=\frac{96}{3{\cdot}6}=\frac{80}{3}=\frac{240}{9}$$

$\therefore \quad r=\frac{4}{3}\sqrt{15}$ सें० मी०

तथा जब $r=3$ सें० मी० हो, तो

$$F=\frac{mm'}{\mu}.\ \frac{1}{9}$$

$$=96\times\frac{1}{9}$$

$$=10\frac{2}{3}$$ डाइन होगी

अतः **उत्तर** $=\frac{4}{3}\sqrt{15}$ सें० मी०, $10\frac{2}{3}$ डाइन

उदाहरण—2. 20 सें० मी० लम्बा एक छड़ चुम्बक दक्षिण ध्रुव उत्तर की ओर करके रखा गया है। उदासीन बिन्दु केन्द्र से 40 सें० मी० की दूरी पर प्राप्त होते हैं। यदि $H=0{\cdot}32$ हो, तो चुम्बक की ध्रुव प्रबलता बताइये। [यू० पी० बोर्ड]

क्योंकि चुम्बक की चुम्बकीय अक्ष (उत्तर से दक्षिण) पृथ्वी के चुम्बकीय क्षेत्र के विपरीत है। अतः उदासीन बिन्दु चुम्बक की अग्राभिमुख स्थिति में आयेंगे।

मान लीजिये चुम्बक की ध्रुव प्रबलता m स० ग० स० इकाई है।

यहाँ $2l=20$ सें० मी०, $d=40$ सें० मी० है।

$\therefore \quad l=10$ सें० मी०

उदासीन बिन्दु पर, चुम्बक का क्षेत्र $F=\frac{2Md}{(d^2-l^2)^2}$

$$=\frac{2\times(20\times m)\times 40}{(40^2-10^2)^2}$$

$$=\frac{1600\ m}{1500\times 1500}$$

$$=\frac{16\ m}{22500}$$ औरस्टेड

उदासीन बिन्दु पर,

$$F=H$$

$$\therefore \quad \frac{16\ m}{22500}=0{\cdot}32$$

$$\therefore \quad m=\frac{{\cdot}02\times 22500}{16}$$

अतः ध्रुव प्रबलता $=450$ स० ग० स० इकाई **उत्तर**

उदाहरण—3. विक्षेप चुम्बकत्व मापी की Tan B स्थिति में दो छोट चुम्बक 50 और 30 सें० मी० दूर रखे गये हैं। वे अविक्षेप (Null) उत्पन्न करते हैं। दोनों के चुम्बकीय घूर्णों का अनुपात बताइये। [यू० पी० बोर्ड '49]

स्पष्ट है कि सुई पर दोनों चुम्बकों के क्षेत्रों की तीव्रता समान होगी। परन्तु Tan B में चुम्बकीय सुई चुम्बक की अपेक्षा आयामाभिमुख स्थिति में होती है। यदि दोनों के चुम्बकीय घूर्ण क्रमश: M_1, M_2 हों, तो

$$\frac{M_1}{50^3}=\frac{M_2}{30^3}$$

$$\therefore \quad \frac{M_1}{M_2}=\frac{50^3}{30^3}=\frac{125}{27}$$

अत: $M_1 : M_2=125 : 27.$

उदाहरण—4. पृथ्वी के क्षैतिज अवयव के प्रभाव में क्षैतिज तल में दोलन करने-वाले एक छोटे चुम्बक का आवर्त्त काल 4 सें० है। जब दूसरा चुम्बक पास लाया जाता है, तो 50 दोलनों में 160 सें० लगते हैं। चुम्बक द्वारा उत्पन्न हुए क्षेत्र की पृथ्वी के क्षैतिज अवयव H से तुलना कीजिये यदि (i) दोनों क्षेत्र एक ही दिशा में हों (ii) विपरीत दिशा में हों। [यू० पी० बोर्ड]

दोलन चुम्बक का आवर्त्त काल यदि T सें० जड़त्व घूर्ण K और चुम्बकीय घूर्ण M हो, तो,

$$T=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}}.\ H \text{ क्षेत्र की तीव्रता है।}$$

मान लीजिये, पृथ्वी का क्षैतिज अवयव H और चुम्बक का क्षेत्र F है। जब दोनों क्षेत्र एक ही दिशा में हैं, तो प्रभाविक क्षेत्र$=F+H$ और जब विपरीत हैं, तो प्रभाविक क्षेत्र$=F-H$ होगा। अत:

$$4 = 2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}}$$

तथा पहली व दूसरी दशा में,

$$\frac{160}{50}=2\pi\sqrt{\frac{K}{M(F+H)}}, \quad \frac{160}{50}=2\pi\sqrt{\frac{K}{M(F-H)}}$$

अब पहले समीकरण में दूसरे से भाग देने से,

$$\frac{4}{16/5}=\sqrt{\frac{F+H}{H}}$$

$$\therefore \quad \frac{F+H}{H}=\left(\frac{5}{4}\right)^2$$

या, $\frac{F}{H}+1=\frac{25}{16}$

और $\frac{F}{H} = \frac{25}{16}-1 = \frac{9}{16}$

$\therefore \; F : H = 9 : 16$

दूसरी बार पहले में तीसरे समीकरण से भाग देकर,

$$\frac{4}{16/5} = \sqrt{\frac{F-H}{H}}$$

$$\frac{F-H}{H}=\left(\frac{5}{4}\right)^2$$

$$\frac{F}{H}-1 = \frac{25}{16}$$

या, $\frac{F}{H} = \frac{25}{16}+1 = \frac{41}{16}$

$\therefore \; F : H = 41 : 16$

अतः उत्तर $=$ (i) 9 : 16 (ii) 41 : 16.

सारांश

कूलम्ब के नियमानुसार m,m' प्रबलता के बिन्दु ध्रुवों के बीच कार्य करनेवाला बल,

$$F=\frac{1}{\mu}\frac{m\,m'}{r^2}$$

r उनके बीच की दूरी है और μ माध्यम की चुम्बक शीलता है।

स्पर्शज्या नियम—यदि F,H दो सम (uniform) और अभिलम्ब क्षेत्र एक साथ चुम्बक पर कार्य करें, तो संतुलन स्थिति में यदि वह H से θ कोण बनाये,

$F=H \tan\,\theta$ होता है।

इस नियम के आधार पर विक्षेप चुम्बकत्वमापी कार्य करता है। इस उपकरण की दो मुख्य स्थितियाँ होती हैं—

(i) Tan A—भुजायें पूर्व पश्चिम होती हैं और चुम्बक भुजाओं के समान्तर होता है।

(ii) Tan B—भुजायें उत्तर-दक्षिण रहती हैं और चुम्बक भुजाओं के अभिलम्ब चुम्बक की दो मुख्य स्थितियों में क्षेत्र की तीव्रता निकाली जाती है।

1. अग्राभिमुख (end on)—बिन्दु चुम्बकीय अक्ष की सीध में होता है और क्षेत्र

$$F=\frac{2\,M\,d}{(d^2-l^2)^2} \text{ होता है।}$$

यहाँ M चुम्बक का चुम्बकीय घूर्ण, l उसकी अर्द्ध लम्बाई और d केन्द्र से दूरी है।

2. आयामाभिमुख (Broad side on)—बिन्दु अक्ष के अर्द्धक लम्ब पर स्थित रहता है और क्षेत्र

$$F=\frac{M}{(d^2+l^2)^{3/2}} \text{ होता है।}$$

छोटे चुम्बक के लिये अग्राभिमुख स्थिति में $F=\frac{2M}{d^3}$ और आयामाभिमुख स्थिति में $F=\frac{M}{d^3}$ होता है।

दोलन चुम्बकत्व मापी का आवर्त्तकाल

$$T=2\pi\sqrt{\frac{K}{MH}} \text{ होता है।}$$

यहाँ K=चुम्बक का जड़त्व घूर्ण
M=चुम्बक का चुम्बकीय घूर्ण
H=दोलन तल में क्षेत्र की तीव्रता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. कूलम्ब के नियमों को समझाइये। इसकी सहायता से इकाई ध्रुव की परिभाषा कीजिये।
2. "उत्क्रम वर्ग नियम" से आप क्या समझते हैं? इसके सत्यापन के लिये किसी प्रयोग का वर्णन कीजिये।
3. चुम्बक के "चुम्बकीय घूर्ण" से आप क्या समझते हैं? सविस्तार समझाइये। चुम्बक की अग्राभिमुख स्थिति म क्षेत्र की तीव्रता के लिये व्यंजक निकालिये।
4. सिद्ध कीजिये कि एक छोटे चुम्बक के अर्द्धक लम्ब (Right bisector) पर क्षेत्र तीव्रता दूरी की तीसरी घात के व्युत्क्रमानुपाती होती है।
5. विक्षेप चुम्बकत्व मापी की Tan A, Tan B स्थितियों का चुम्बक की अग्राभिमुख और आयामाभिमुख स्थितियों से क्या सम्बन्ध है? चुम्बकत्व मापी को Tan A, Tan B स्थितियों में समायोजित करने की विधि लिखिये।
6. चुम्बकत्व मापी की Tan A स्थिति में दो चुम्बकों के चुम्बकीय घूर्णों की तुलना करने की विधि बताइये।
7. Tan B स्थिति में समायोजित करके चुम्बकत्व मापी से दो चुम्बकीय घूर्णों की तुलना कैसे करेंगे?
8. दोलन चुम्बकत्व मापी की रचना बताइये। इसकी सहायता से दो चुम्बकों के चुम्बकीय घूर्णों की तुलना किस प्रकार होती है?
9. दो चुम्बकीय क्षेत्रों की तुलना के लिये दोलन चुम्बकत्व मापी को किस प्रकार प्रयुक्त करेंगे?
10. M और H की व्याख्या कीजिये। इनका परम मान निकालने की एक अच्छी विधि बताइये।
11. एक कम्पास सुई केवल पार्थिव क्षेत्र में 30 दोलन प्रति मिनट करती है। जब इसके पास एक छड़ चुम्बक इस तरह रख देते हैं कि संयुक्त क्षेत्र की दिशा नहीं

बदलती, तो वह 40 दोलन प्रति मिनट करती है। यदि छड़ चुम्बक के ध्रुव बदल दें, तो यह कितने कम्पन प्रति मिनट करेगी ? [उत्कल]

संकेत—पहली बार संयुक्त क्षेत्र$=H-F$

ध्रुव पलटने पर संयुक्त क्षेत्र$=H+F$

(उत्तर—14·2 दोलन/मि०)

12. एक छोटे से छड़ चुम्बक को पृथ्वी की चुम्बकीय याम्योत्तर में इस प्रकार रखा गया है कि उसका उत्तर-ध्रुव दक्षिण दिशा में है। इस प्रबन्ध से उदासीन बिन्दु, चुम्वक के दक्षिण ध्रुव से 24 सें० मी० दूरी पर, उसकी लम्बाई की दिशा में आता है। चुम्बक की अक्ष वाली रेखा पर उसके दक्षिणी ध्रुव से 20 सें० मी० दूर, उत्तर दिशा में स्थित बिन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता की गणना कीजिये। [राजपूताना—'45] **(उत्तर**—0·21 औरस्टेड)

13. एक छोटा चुम्बक, पृथ्वी के क्षेत्र में दोलन करता है। उसके पूर्व अग्राभिमुख स्थिति में एक दंड चुम्बक को रखने पर वह 60° विचलित होता है। संयुक्त क्षेत्र को तीव्रता (intensity) ज्ञात करिए। यदि पृथ्वी के क्षेत्र में दोलनों की संख्या 10 प्रति मिनट हो, तो अब वह क्या होगी ? ($H=36$ सी० जी० एस० इकाइयाँ) **(उत्तर**—1092)

14. एक ही प्रकार के दो चुम्बक (जिनके घूण M और $2M$ हैं) किसी फ्रेम पर क्षैतिज स्थिति में स्वस्तिका के रूप में आयोजित हैं। यदि इस समूह को केन्द्र पर एक उदग्र धागे से लटका दें, तो बताओ कि पृथ्वी के चुम्बकीय क्षत्र में वह किस स्थिति में रुकेगी ?

प्रत्येक चुम्बक की सीध में केन्द्र से d सें० मी० दूर पर चुम्वकीय क्षेत्र की तीव्रता ज्ञात करिए। **(उत्तर**—कम घूर्ण के चुम्बक से स्प$^{-1}$ $\frac{1}{2}$ कोण पर,

$$\left(\frac{\sqrt{17}M}{d^3}, \frac{2\sqrt{2}M}{d^3}\right)$$

15. 900 घूर्ण और 50 सी० जी० एस० इकाइयों की ध्रुव शक्ति की एक चुम्बकीय सुई, एक क्षैतिज तल में चलने को स्वतंत्र है, जहाँ पृथ्वी का चुम्बकीय क्षेत्र ·36 गाउस है। यह याम्योत्तर से 30° पर एक डोरी से खिचकर संतुलित है, जो उसके उत्तरी ध्रुव को पूर्व दिशा में खींचती है। डोरी का तनाव ज्ञात करिए। **(उत्तर**—20·784 डाइन)

16. एक चुम्बक, चुम्बकीय याम्योत्तर में एक बिना मरोड़ के उदग्र तार द्वारा टिका हुआ है। उसे याम्योत्तर से 45° विचलित करने के लिए तार के ऊपरी सिरे को आधा चक्कर घुमाना पड़ता है। चुम्बक को याम्योत्तर से 60° बिचलित करने के लिए ऊपरी सिरे को कितना घुमाना होगा ? एक दूसरा चुम्बक भी उसी तार से लटकाया गया है। उसे उतना ही विचलित करने के लिए, ऊपरी तार को एक पूरा चक्कर घुमाना पड़ता है। दोनों चुम्बकों के घूर्णों की तुलना कीजिए।

(उत्तर—$\frac{\pi}{2}\sqrt{6}, \sqrt{6} : 4$)

17. एक अचुम्बकित इस्पात की सुई अपने गुरुत्व-केन्द्र पर क्षैतिज स्थिति में टिकी हुई है। चुम्बकित करने पर वह विचलित हो जाती है। पुनः क्षैतिज स्थिति में

लाने के लिए, गुरुत्व-केन्द्र से 5 सें० मी० की दूरी पर, उस पर एक ·05 ग्राम का भार रखना होता है। उसके चुम्बकीय घूर्ण को ज्ञात करिए। ($H=\cdot25$ गाउस ; $g=980$ सें० मी० प्रति सेकंड², अवपात कोण $=30^\circ$) (**उत्तर**–$980\sqrt{3}$ इकाइयाँ)

18. एक 100 सें० मी० लम्बा तथा 1 वर्ग मिलीमीटर परिच्छेद का लोहे का दंड, समरूप से चुम्बकित किया जाता है, और उसका दोलन काल 5 सेकंड ज्ञात होता है। तब उसे दो बराबर टुकड़ों में विभक्त किया जाता है। प्रत्येक का दोलन काल क्या होगा? (**उत्तर**—2·5 सेकंड)

19. उत्क्रम वर्ग नियम को आप निम्न वस्तुओं से किस प्रकार सत्यापित करेंगे (a) लगभग 1 मीटर लम्बा छड़ चुम्बक, (b) एक छोटी निलम्बित चुम्बकीय सुई, (c) एक रोक घड़ी (Stop-watch)।

20. दो चुम्बक A और B, एक ही चुम्बकीय क्षेत्र में दोलन करते हैं। A, प्रति मिनट 15 दोलन करता है, और B 10; फिर चुम्वक A को एक चुम्बकीय क्षेत्र में और B को दूसरे में दोलित कराते हैं। अब A, 5 दोलन और B, 20 दोलन प्रति मिनट करते हैं। यदि दोनों के जाडच-घूर्ण (Moments of inertia) बराबर हों, तो उनके चुम्बकीय घूर्णों की तुलना कीजिए। (**उत्तर**—1 : 36, 9 : 4)

21. एक छड़ चुम्बक का ध्रुव-प्राबल्य, 50 इकाई है, और उसके ध्रुवों के बीच की दूरी 10 सें० मी० है। उसके ध्रुव-प्राबल्य (pole strength) को निर्धारण करने की कोई विधि बताइये।

22. एक छड़ चुम्बक जिसका घूर्ण 9860 C. *G*. *S*. इकाई है, क्षैतिज तल में याम्योत्तर से 60° विचलित होता है। किया गया कार्य ज्ञात करिए। चुम्बक को इस स्थिति में रखे रहने के लिए आवश्यक बलयुग्म का घूर्ण भी निकालिए। ($H=\cdot2$ गौस) (**उत्तर**—986 अर्ग, $986\sqrt{3}$ डाइन सें० मी०)

23. भू-चुम्बक के क्षैतिज भाग में एक छोटा चुम्बक 4 सेकंड में एक कम्पन करता है। उसके समीप दूसरा चुम्बक लाने पर 50 कम्पन 160 सेकिंड में होते हैं। चुम्बक के कारण उत्पन्न क्षेत्र तथा भू-चुम्बक के क्षेत्रों की तुलना कीजिए, जब (a) दोनों क्षेत्र एक ही दिशा में, (b) विपरीत दिशा में आयोजित हों। (**उत्तर**—9 : 16, 41 : 16)

24. एक ही फौलाद के बने दो चुम्बक जिनकी विमाएँ क्रमशः $10\times3\times\cdot5$ तथा $20\times4\times\cdot7$ हैं, क्षैतिज तल में समान दर से दोलन करते हैं। उनके घूर्णों की तुलना कीजिए। (**उत्तर**—1 : 14.2)

25. एक स्थान पर क्षैतिज तल में जहाँ अवपात कोण 30° है, एक चुम्बक 50 कम्पन प्रति मिनट करता है। जिस स्थान पर अवपात कोण 45° है, वही चुम्बक 1 मिनट में 40 कम्पन करता है। दोनों स्थानों पर भू-चुम्बक की पूर्ण तीव्रताओं की तुलना कीजिए। [यू० पी० बोर्ड 1954] (**उत्तर**—1·275 : 1)

अध्याय 4

पार्थिव चुम्बकत्व

(Terrestrial Magnetism)

4.1. **भू-चुम्बक (Earth Magnet)**—गुरुत्व केन्द्र से स्वतन्त्रता पूर्वक लटका हुआ चुम्बक सदैव उत्तर-दक्षिण दिशा में आ कर स्थिर होता है। पृथ्वी के दक्षिणी और उत्तरी गोलार्द्धों में स्वतन्त्र लटकी हुई सुई को दक्षिण-उत्तर दिशा में ले जाने से उसकी अक्ष और क्षैतिज तल के बीच का कोण भी लगातार बदलता जाता है। इसी प्रकार के अन्य मापनों से यह स्पष्ट है कि पृथ्वी एक बहुत बड़े चुम्बक की तरह व्यवहार करती है। पृथ्वी के चुम्बकत्व का कारण चाहे कुछ भी हो, वायु मंडलीय विद्युत् धारा अथवा चुम्बकित पदार्थों की उपस्थिति, परन्तु सब निरीक्षणों का निष्कर्ष यह है कि पृथ्वी के अन्दर एक काल्पनिक छड़ चुम्बक की उपस्थिति मान लेनी होगी। इस चुम्बक का दक्षिणी ध्रुव भौगोलिक उत्तरी ध्रुव से लगभग 1000 मील कनाडा के "बूथिया फैलिक्स" (Boothia Felix) नामक स्थान के पास (अक्षांश 70·75° उत्तर, देशान्तर 96° पश्चिम) तथा चुम्बकीय उत्तरी ध्रुव साउथ विक्टोरिया लैण्ड के पास (अक्षांश 73° दक्षिण, देशान्तर 155° पूर्व) स्थित हैं। काल्पनिक पार्थिव चुम्बक की चुम्बकीय अक्ष भौगोलिक उत्तर दक्षिण रेखा से 17° का कोण बनाती है।

4.2. **किसी स्थान के चुम्बकीय तत्व (Magnetic elements of a place)**—पार्थिव चुम्बकत्व के कारण उत्पन्न हुए चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता एक स्थान से दूसरे स्थान के लिये बदलती जाती है। परन्तु एक स्थान पर क्षेत्र की सम्पूर्ण तीव्रता दिशा व परिमाण दोनों में पूर्णतया ज्ञात करने के लिये तीन चुम्बकीय राशियों की आवश्यकता पड़ती है—

1. दिक्पात (Declination)
2. अवपात (Dip) या नमन (Inclination) कोण।
3. क्षैतिज तीव्रता (Horizontal intensity)।

क्योंकि ये तीनों राशियाँ स्थानीय चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता को अद्वितीय रूप से व्यक्त कर सकती है इसीलिये इनको स्थान विशेष के चुम्बकीय तत्व (Magnetic elements) कहते हैं।

परिभाषाएँ—

दिक्पात (Declination)—वह कोण है, जो स्थान विशेष पर चुम्बकीय याम्योत्तर संगत भौगोलिक याम्योत्तर के साथ बनाती है।

चुम्बकीय याम्योत्तर—स्थान विशेष पर स्वतन्त्र लटके हुए चुम्बक के चुम्बकीय अक्ष से गुज़रनेवाला वह ऊर्ध्व तल है, जो पार्थिव उत्तरी ध्रुव को पार्थिव दक्षिणी ध्रुव से मिलाता है।

भौगोलिक याम्योत्तर—स्थान विशेष से गुज़रनेवाला वह ऊर्ध्व तल है, जो पार्थिव भौगोलिक दक्षिणी ध्रुव को उत्तरी ध्रुव से मिलाता है।

अवपात (Dip) कोण—पार्थिव चुम्बकीय क्षेत्र की पूर्ण तीव्रता और क्षैतिज तल के बीच बने कोण को अवपात कहते हैं। परन्तु क्योंकि स्वतन्त्र लटका हुआ चुम्बक स्थानीय पूर्ण तीव्रता की दिशा में ही स्थिर रहता है, अतः अवपात उस कोण से नापा जाता है, जो स्वतन्त्र लटके हुए चुम्वक की चुम्बकीय अक्ष क्षैतिज तल से बनाती है।

क्षैतिज तीव्रता (H)—यह पूर्ण तीव्रता का क्षैतिज विश्लिष्ट भाग है। इसके परम मान के निकालने की विधि पहले अध्याय में बताई गई थी।

ऊर्ध्व तीव्रता (V)—यह पूर्ण तीव्रता का ऊर्ध्व घटक है।

यदि पूर्ण तीव्रता I गास हो और अवपात कोण ϕ तो स्पष्टतया,

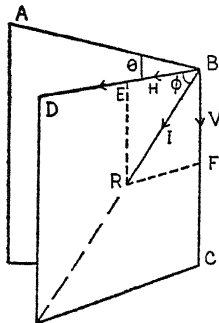
क्षैतिज तीव्रता $H = I \cos \phi$

और ऊर्ध्व तीव्रता $V = I \sin \phi$

$$\therefore \quad H^2 + V^2 = I^2 \cos^2 \phi + I^2 \sin^2 \phi$$
$$= I^2 (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi)$$

या, $H^2 + V^2 = I^2 \quad (\because \cos^2 \phi + \sin^2 \phi = I)$

तथा, $\frac{V}{H} = \tan \phi$ होगा।

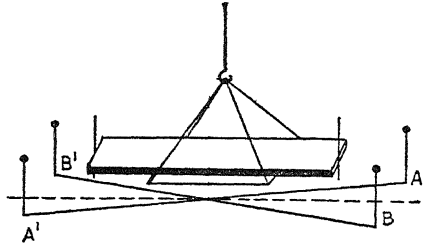
किसी स्थान के समस्त चुम्बकीय अवयव चित्र 47 की भाँति एक साथ व्यक्त किये जा सकते हैं। चित्र में ABC तल भौगोलिक याम्योत्तर को व्यक्त करता है और DBC तल चुम्बकीय याम्योत्तर को दोनों के बीच का कोण θ दिक्पात है। चुम्बकीय याम्योत्तर के तल ही में BR ऋजु रेखा पूर्ण तीव्रता I को व्यक्त करती है। I और क्षैतिज BD के बीच का कोण ϕ अवपात है। BD की दिशा में $H = I \cos \phi$ क्षैतिज तीव्रता है और BC की दिशा में ऊर्ध्व तीव्रता $V = I \sin \phi$ है।

चित्र 47

4.3. दिक्पात (Declination) का ज्ञात करना—

दिक्पात को ज्ञात करने के लिये भौगोलिक और चुम्बकीय दोनों याम्योत्तरों को ज्ञात करना होता है।

भौगोलिक याम्योत्तर के लिये खुले स्थान पर जहाँ सारे दिन धूप रहती हो, एक दो फुट लम्बी लकड़ी की छड़ ऊर्ध्व गाड़ दीजिये। नौ-दस बजे (प्रातः) के लगभग छड़ की

परछाईं के सिरे से जानेवाला एक वृत्त खींचिये जिसकी त्रिज्या (radius) परछाइ के बराबर और केन्द्र छड़ का निचला सिरा हो। परछाईं की दिशा भी खींच लीजिये। अब दोपहर बाद लगभग दो बजे परछाईं फिर वृत्त को छुयेगी! परछाई की इस दूसरी स्थिति को भी खींच लो, परछाईं की इन दोनों स्थितियों के बीच के कोण की अर्द्धक रेखा ही भौगोलिक याम्योत्तर की दिशा बतायेगी।

चुम्बकीय याम्योत्तर--एक छड़ चुम्बक के दोनों सिरों पर मोटाई के समान्तर एक-एक पिन चिपका कर चुम्बक को एक बिना वटे रेशम के फंदे से क्षैतिज तल में स्वतन्त्र लटका दीजिये। नीचे कागज़ पर पिनों के नीचे A और A' बिन्दु लगा दीजिये। अब चुम्बक को पलट दीजिये जिससे ऊपर का मुखपृष्ठ (face) नीचे हो जाय, स्थिर होने पर फिर पिनों के नीचे B, B' बिन्दु लगा दीजिये। ऋजु रेखा AA' और BB' को मिला दीजिये। दोनों के बीच के कोण की अर्द्धक रेखा चुम्बकीय याम्योत्तर बतायेगी और पुनः स्थिर अवस्था में चुम्बकीय याम्योत्तर के समान्तर चुम्बक के तल पर खींची गई रेखा चुम्बक की अक्ष प्रदर्शित करेगी। इस प्रकार भौगोलिक और चुम्बकीय याम्योत्तर ज्ञात करके दिक्पात निकाला जा सकता है।

चित्र 48

4.4. अवपात (Dip) का नापना

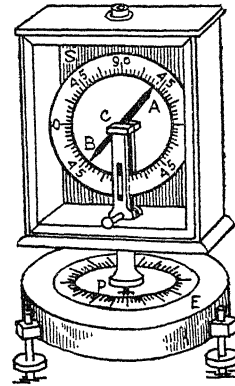
--चित्र 49 में दिखाये हुए अवपात वृत्त (Dip circle) की सहायता से ही अवपात कोण नापा जाता है।

अवपात वृत्त की बनावट--(i) AB एक शक्तिशाली चुम्बकीय सुई है। इसके गुरुत्व केन्द्र से जानेवाली क्षैतिज अक्ष C अकीक (agate) की असिकोरों (knife edges) पर टिकी है।

(ii) सुई के स्वतन्त्र परिभ्रमण के ऊर्ध्व तल में ही एक वृत्ताकार अंशांकित पैमाना S लगा है। S की परिधि 0°–90° के चार भागों में बँटी है। 0–0 रेखा क्षैतिज और 90–90 ऊर्ध्व रहती है।

चित्र 49

(iii) यह सब एक केस में बन्द है जिसमें दो ओर शीशा लगा है ताकि वायु के झोंकों से सुरक्षित रहे।

(iv) केस ऊर्ध्व अक्ष के गिर्द घूम सकता है। परिभ्रमण कोण क्षैतिज आधार पर लगे क्षैतिज वृत्ताकार अंशांकित पैमाने E पर निर्देशक P की

सहायता से नापा जा सकता है। निर्देशक के साथ एक वृत्ताकार वर्नियर भी चलता है।

(v) आधार को क्षैतिज और सुई के परिभ्रमण तल को ऊर्ध्व करने के लिये आधार के नीचे तीन सम तलन पेंच (levelling screws) भी लगे हैं।

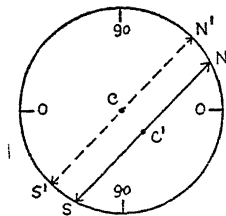
समायोजन की विधि—(i) स्प्रिट लेविल को तीन में से किन्हीं दो सम तलन पचों को मिलानेवाली ऋजु रेखा के समानान्तर आधार पर रख कर उन्हीं दोनों पेचों को चला कर बुलबुले (Bubble) को केन्द्र (Centre) में लाइये। अब पहली दिशा के अभिलम्ब स्प्रिट लेविल रखिये और केवल तीसरे (अकेले) समतलन पेंच को ही चला कर स्प्रिट लेविल के बुलबुले को केन्द्र में लाइये। इससे आधार क्षैतिज हो गया।

(ii) केस को ऊर्ध्व अक्ष के गिर्द घुमा कर वह स्थिति लाइये जब कि सुई ठीक ऊर्ध्व (90°–90°) हो जाय। इस समय सुई पर केवल ऊर्ध्व घटक (V) ही कार्य कर रहा है। क्षैतिज घटक शून्य है। परन्तु चुम्बकीय याम्योत्तर से α कोण बनाने वाले ऊर्ध्व तल में ऊर्ध्व घटक (V) और क्षैतिज घटक $H \cos \alpha$ होता है। जहाँ V, H चुम्बकीय याम्योत्तर के संगत घटक हैं। अतः इस स्थिति में यदि क्षैतिज घटक शून्य है, तो $$H \cos\alpha = 0^\circ$$
और $$\alpha = 90^\circ \text{ होगा।}$$

अर्थात् जब सुई ठीक ऊर्ध्व हो जाती है, तो उसका तल चुम्बकीय याम्योत्तर से 90° का कोण बनाता है।

(iii) अतः आधार के वृत्ताकार पैमाने और निर्देशक की सहायता से केस को वामावर्त या दक्षिणावर्त 90° के कोण से घुमा दीजिये।

सुई चुम्बकीय याम्योत्तर में परिभ्रमण करने को स्वतन्त्र है। स्थिर अवस्था में ऊर्ध्व पैमाने पर सुई की स्थिति पढ़ कर उसके और क्षैतिज (00) के बीच कोण ज्ञात कर लीजिये। यही अवपात (dip) कोण है।

विभिन्न त्रुटियाँ और उनके सुधार—सामान्य अवपात-वृत्त में निम्न त्रुटियाँ हो सकती हैं—

चित्र 50 (a)

1. **विकेन्द्रीयता की त्रुटि (Eccentricity Error)**—सुई की धुरी पैमाने के केन्द्र C से न गुज़र कर C' से जाती है। सुई स्थिति NS है, परन्तु होनी चाहिये थी $N'S'$। वास्तविक अवपात $\phi = ON' = OS'$ है। परन्तु दूषित अवस्था में सुई के एक सिरे पर $\phi_1 = ON = ON' - NN'$ है।

और दूसरे सिरे पर, $\phi_2 = OS = OS' + SS'$ है।

परन्तु $NN' = SS'$ $\therefore \phi_1 + \phi_2 = ON' + OS' = 2\phi$

$$\text{या,} \quad \phi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \text{ हुआ ।}$$

अत: विकेन्द्रीयता की त्रुटि से स्वतन्त्र करने के लिये सुई के दोनों सिरों के पाठों का मध्यमान लेना चाहिये ।

2. **शून्य-शून्य रेखा की त्रुटि [(0 – 0) Line Error]**—ऊर्ध्व पैमाना कुछ घूम गया है। 0–0 रेखा क्षैतिज न होकर क्षैतिज से $0-0'$ कोण बनाती है। [चित्र 50 *b* (i)] वास्तविक अवपात $\phi = O'N = O'S$

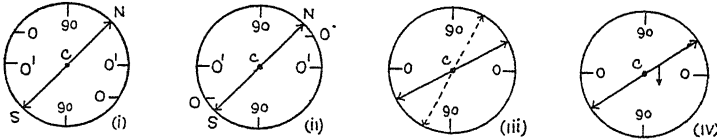
परन्तु व्यक्त अवपात $\phi_1 = ON = O'N + OO'$

केस को 180° घुमाने से 50 *b* (ii) की स्थिति होगी। यहाँ पर व्यक्त अवपात

$$\phi_2 = ON = O'N - OO'$$

$$\therefore \quad \phi_1 + \phi_2 = 2O'N = 2\phi$$

$$\text{या } \phi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

अत: (1) और (2) त्रुटियों को हटाने के लिये केस को 180 घुमाओ और दोनों सिरे पढ़ो। इन चारों पाठों का मध्यमान लो।

चित्र 50(b)

3. **चुम्बकीय अक्ष की त्रुटि (Magnetic axis Error)**—सुई की चुम्बकीय अक्ष ज्यामितीय अक्ष के साथ-साथ न हो कर उससे झुकी हुई है। सुई को उसके आधार पर पलट दो। पहले यदि चुम्बकीय अक्ष ज्यामितीय अक्ष से एक ओर (नीचे) झुकी थी तो अब दूसरी ओर (ऊपर) झुकी होगी। दोनों स्थितियों में (1) और (2) के अवलोकन लेकर मध्यमान लीजिये। [चित्र 50(b) (iii)]

4. **गुरुत्व केन्द्र की त्रुटि (Centre of Gravity Error)**—परिभ्रमण अक्ष (Axis of rotation) पर गुरुत्व केन्द्र (*C.G.*) न होकर *N* ध्रुव की ओर स्थित है। सुई का भार गुरुत्व केन्द्र से नीचे कार्य करेगा और *N* ध्रुव को नीचे झुका देगा। अवपात का मान वास्तविक अवपात से कम होगा। [चित्र 50(b) iv]

सुई को निकाल कर पुन: विपरीत दिशा में चुम्बकित कीजिये और (1), (2), (3) अवलोकनों को दोहराइये। इस प्रकार लिये गये 16 पाठों का मध्यमान इन चारों त्रुटियों से स्वतन्त्र होगा।

4.5. **चुम्बकीय तत्त्वों के मान में परिवर्तन**—किसा स्थान विशेष के चुम्बकीय तत्त्व समय के साथ बदलते रहते हैं। इनके परिवर्तन निम्न श्रेणियों के होते हैं—

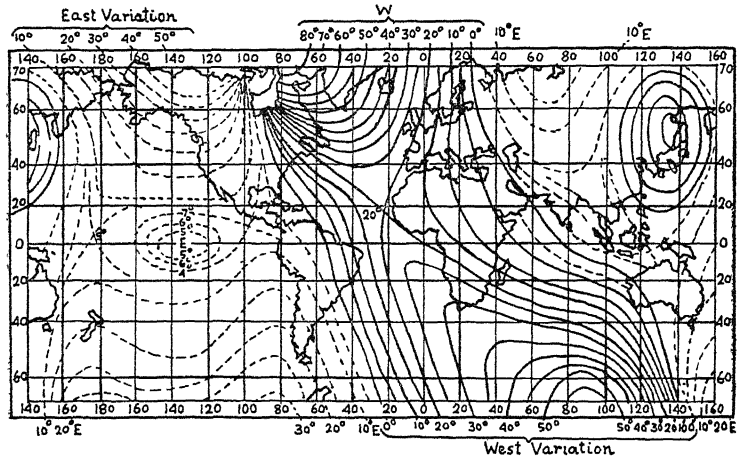
(i) **दीर्घकालिक परिवर्तन (Secular variation)**—प्रयोगों द्वारा ज्ञात हुआ है कि पृथ्वी के चुम्बकीय ध्रुव भूगोलिक ध्रुवों के गिर्द परिक्रमा किया करते हैं, जो लगभग 160 वर्षों में पूरी होती है। अतः रफ्तार से सब स्थानों पर पृश्वी के चुम्बकीय क्षेत्र की पूर्ण तीव्रता भी बदलती रहती है।

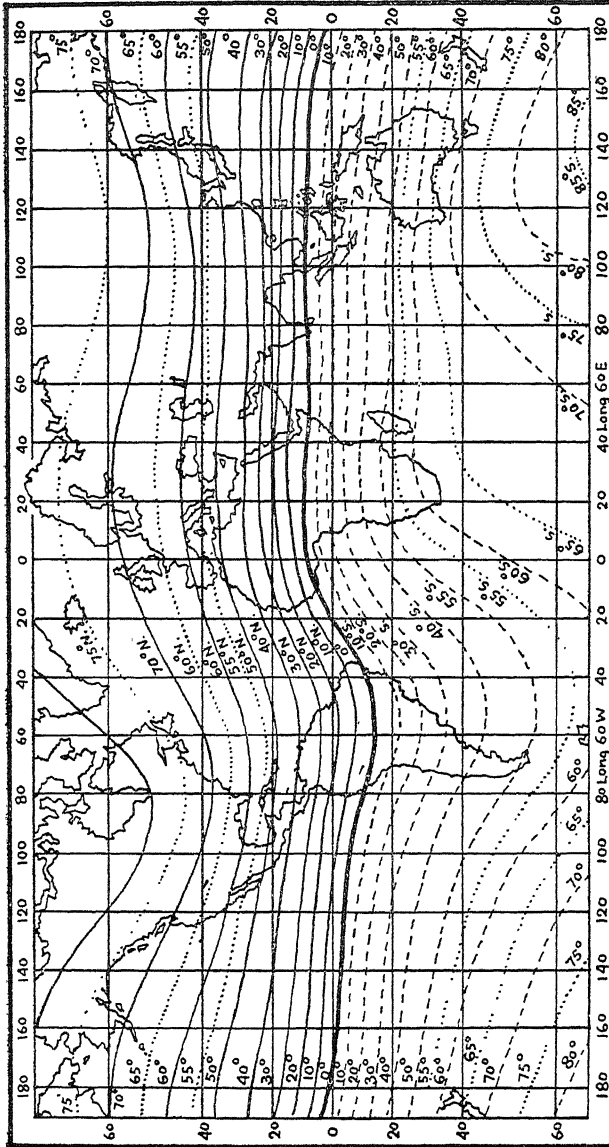
(ii) **वार्षिक परिवर्तन (Annual variations)**—विभिन्न चुम्बकीय तत्व वर्ष के किसी समय अधिकतम और अन्य समय पर न्यूनतम मान प्राप्त करते हैं। उदाहरणतः दिक्पात फरवरी मास में अधिकतम और अगस्त में न्यूनतम होता है।

(iii) **दैनिक परिवर्तन (Daily variations)**—चौबीस घंटों में किसी समय एक तत्व अधिकतम और दूसरे समय न्यूनतम हो सकता है। उनमें एक कालिक (Periodic) परिवर्तन प्रायः देखा गया है।

(iv) **चुम्बकीय तूफान (Magnetic Storms)**—कभी-कभी चुम्बकीय तत्वों में एकाएक परिवर्तन भी हो जाते हैं। यह प्रायः ज्वालामुखी के फटने, अरोरा वोरियालिस (Aurora Borealis) के चमकने और सूर्य धब्बों के प्रकट होने के समय होता है।

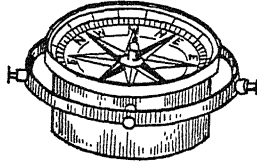
4.6. **चुम्बकीय मानचित्र (Magnetic Maps)**—

(1) समदिकपाती रेखायें (Isogonic lines) संसार के मानचित्र में उन स्थानों से गुज़रती हैं जहाँ पर दिकपात (Declination) समान होता है।

चित्र 51

शून्य दिकपाती रेखायें (Agonic lines) शून्य दिकपात के स्थानों को मिलाती हैं। (चित्र 51)

चित्र 52

(ii) समावपाती (Isoclinic) रेखायें समान अवपात कोण (dip) के स्थानों से गुज़रती हैं और चुम्बकीय निरक्ष (Magnetic equator) वह समावपाती रेखा है, जिस पर अवपात शून्य हो। (चित्र 52)

(iii) सम-तीव्रता (Isodynamic) रेखायें उन स्थानों को मिलाती हैं, जहाँ क्षैतिज अवयव H समान होता है।

4.7. **नाविक-दिक्सूचक (Mariner's Compass)**—यह यन्त्र समुद्र के बीच जहाज पर नाविकों को दिशा बताता है। इसमें चुम्बक के दैशिक (Directional) गुण से लाभ उठाया गया है।

चित्र 53

रचना—आठ पतली और शक्तिशाली चुम्बकीय सुइयाँ परस्पर समानान्तर बाँध कर वृत्ताकार गत्ते के डायल के नीचे लगा देते हैं। एक अर्द्ध गोलाकार प्याले में लगी चूल पर सुई स्वतन्त्र परिभ्रमण करती है। डायल की परिधि अंशांकित और 32 भागों में विभाजित होती है। चुम्बक की अक्ष की दिशा में डायल पर N–S (उत्तर-दक्षिण) दिशा अंकित होती है। इसी प्रकार कम्पास के समस्त 32 विन्दु (Points of the Compass) विभिन्न दिशाओं को सूचित करते हैं। ताकि जहाज के हिलाने पर भी सुई क्षैतिज रह सके अर्द्ध गोलाकार कटोरे की परिधि पर आमने-सामने के दो बिन्दुओं से कटोरा एक क्षैतिज छल्ले में लटका रहता है और स्वयं छल्ला आमने-सामने के दो बिन्दुओं पर केस में लटका रहता है। परन्तु प्याले की परिभ्रमण अक्ष छल्ले की परिभ्रमण अक्ष के समकोणिक होती है। इस प्रबन्ध से जहाज की हाल का सुई पर कोई प्रभाव नहीं होता। इसको गिम्बल्स (Gimbals) का प्रबन्ध (arrangement) कहते हैं।

सारांश

पृथ्वी एक चुम्बक की भाँति कार्य करती है। किसी स्थान के लिये (i) दिक्पात, (ii) अवपात और (iii) क्षैतिज तीव्रता चुम्बकीय अवयव कहलाते हैं।
अवपात कोण नापने के लिये अवपात वृत्त काम में आता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. किसी स्थान के चुम्बकीय तत्व कौन-कौन हैं? इनको यह नाम (चुम्बकीय तत्व) क्यों दिया गया? इनका पारस्परिक सम्बन्ध बताइये।
2. किसी स्थान का दिकपात कैसे ज्ञात करेंगे?
3. अपनी प्रयोगशाला में अवपात कोण निकालने की विधि बताइये। विभिन्न त्रुटियों और उनके सुधारों पर भी प्रकाश डालिये।

4. टिप्पणी लिखिये——
   (i) नाविक का दिक् सूचक, (ii) सम दिक्पाती रेखायें।
   (iii) समावपाती रेखायें, (iv) चुम्बकीय निरक्ष।
5. अवपात कोण निकालने के किसी प्रयोग में एक स्थान पर प्रतीयमान अवपात 38° है और उसके लम्बवत् तल में 20° है। उस स्थान का वास्तविक अवपात क्या है? (लगभग, $17^\circ 12'$)
6. (i) सिद्ध कीजिए कि किसी चुम्बक पर पृथ्वी की क्रिया उसे एक निश्चित दिशा में रोक देती है।
   (ii) अचुम्बकित ऊर्ध्वाधर लौह-दंड पर पृथ्वी का क्या प्रेरणीय (inductive) प्रभाव पड़ेगा? क्या भारत और आस्ट्रेलिया में एक-सा ही प्रभाव पड़ेगा? अपने उत्तर के साथ कारण भी दीजिए।
7. पृथ्वी के चुम्बकीय क्षेत्र पर एक संक्षिप्त निबन्ध लिखिए।
8. आपको एक छड़ चुम्बक दिया जाता है, जिसके ध्रुव संमीतीय अक्ष (axis of symmetry) पर नहीं हैं। उसके द्वारा चुम्बकीय याम्योत्तर कैसे निर्धारित करिएगा?
9. एक चपटे आयताकार लकड़ी के बक्स के भीतर रखे हुए एक चुम्बक के चुम्बकीय अक्ष को, बिना बक्स खोले, किस प्रकार ज्ञात किया जा सकता है?
10. किसी स्थान के दिक्पात कोण को किस प्रकार निकाला जा सकता है?

    एक अवपात वृत्त को इस प्रकार व्यवस्थित किया जाता है कि सुई उदग्र हो जाए। तब वृत्त को उदग्र अक्ष पर 30° घुमाया जाता है, इस स्थिति में अवपात कोण 45° निकलता है। वास्तविक अवपात कोण क्या होगा?

    (उत्तर, स्प$^{-1}$ $\frac{1}{2}$.)
11. नाविकों की दिक्सूचक सुई का वर्णन कीजिए।

तृतीय प्रकरण

स्थिर विद्युत् विज्ञान

(ELECTRO - STATICS)

अध्याय 1

घर्षण विद्युत्–इलैक्ट्रन सिद्धान्त
(Frictional Electricity—Electron Threory)

1.1. **इतिहास**—सर्वप्रथम यूनान के एक बहुत बड़े विद्वान थेल्स (Thales) ने ईसा से कई सौ वर्ष पूर्व देखा कि जब एम्बर (Amber) को बिल्ली को खाल से रगड़ा जाता है, तो उसमें एक अद्भुत गुण उत्पन्न हो जाता है। रगड़ने के वाद वह काग़ज़ के छोटे-छोटे टुकड़ों या कार्क के कणों को आकर्षित करने लगती है। यूनानी भाषा में एम्बर को इलैक्ट्रन (electron) कहते हैं। इसी आकर्षक गुण के कारण इसका नाम इलैक्ट्रिसिटी (Electricity) पड़ा। हिन्दी में इसको विद्युत् कहते हैं। जिस वस्तु में यह गुण उपस्थित रहता है "विद्युन्मय" या "विद्युन्वित" (electrified) कहलाती है। इस गुण की मात्रा को विद्युत आवेश (electric charge) कहते हैं।

लगभग 2000 वर्ष बाद रानी एलिज़ाबेथ के हकीम (Physician) डॉ० गिल्वर्ट ने खोज की कि विद्युन्मय विद्युन्वित होना केवल एम्बर का ही गुण नहीं है वरन्, और भी बहुत से पदार्थ जैसे शीशा, रेशम, लाख, बिरोजा (Resin), एबोनाइट आदि सब अनुकूल अवस्था में विद्युन्मय हो सकते हैं।

1.2. **विद्युत् के दो प्रकार (Two kinds of electricity)**—

(i) सूखी शीशे की छड़ सूखी रेशम से रगड़ने पर काग़ज़ के टुकड़ों को आकर्षित करती है। इसी प्रकार एबोनाइट की छड़ बिल्ली के खाल से रगड़ी जाने पर विद्युन्मय हो जाती है।

(ii) शीशे और एबोनाइट की एक-एक छड़ (i) की भाँति रगड़ कर रेशम के डोरे से बाँध कर अलग-अलग लटका दीजिये। शीशे की दूसरी छड़ रेशम से रगड़ कर लटकी हुई छड़ों के पास ले जाइये। लटकी हुई विद्युन्मय शीशे की छड़ प्रतिकर्षित (repel) होगी, परन्तु विद्युन्मय एवोनाइट की लटकी हुई छड़ आकर्षित (attract) होगी। अब यही प्रयोग एबोनाइट की दूसरी विद्युन्मय छड़ से दोहराइये। एवोनाइट की छड़ के साथ प्रतिकर्षण और शीशे की छड़ के साथ आकर्षण मिलेगा।

इससे सिद्ध हुआ कि रेशम से रगड़ने से शीशे की छड़ पर उत्पन्न हुई विद्युत् उस विद्युत् से भिन्न है, जो एबोनाइट की छड़ पर बिल्ली की खाल से रगड़ने पर उत्पन्न होती है। शीशे पर रेशम की रगड़ से उत्पन्न होनेवाली विद्युत् को धनात्मक (Positive+) तथा बिल्ली की खाल के साथ रगड़ने से एबोनाइट की छड़ पर उत्पन्न होनेवाली विद्युत् को ऋणात्मक (Negative−) विद्युत् कहते हैं।

एक को धनात्मक और दूसरे प्रकार की विद्युत् का ऋणात्मक नाम देने के पीछे कोई भी वैज्ञानिक आधार नहीं है। यह केवल यह दर्शाने का ढंग है कि दोनों विद्युत् परस्पर भिन्न या असमान हैं। "धनात्मक" (Positive) और "ऋणात्मक" (Negative) नाम सर्वप्रथम बेन्जामिन फ्रैंकलिन (Benjamin Franklin) ने प्रस्तुत किये थे।

पिछले (i) और (ii) प्रयोगों से एक बहुत ही महत्वपूर्ण तथ्य स्थापित हो गया। समान विद्युत् आवेशों से विद्युन्वित वस्तुओं में विकर्षण (Repulsion) होता है और असमान आवेशों से आवेशित (charged) वस्तुओं में आकर्षण (attraction) होता है।

1.3. विद्युन्वित वस्तु का सरलतम गुण यह है कि वह निरावेशित (uncharged) वस्तुओं को आकर्षित करती है। परन्तु पिछली धारा के अनुसार एक आवेशित वस्तु विपरीत (असमान) विद्युत् से आवेशित वस्तु को भी आकर्षित करती है। अतः आकर्षण की घटना के आधार पर यह स्थापित नहीं किया जा सकता कि अमुक वस्तु आवेशित है या नहीं। परन्तु प्रतिकर्षण केवल समान विद्युत् से आवेशित वस्तुओं में ही हो सकता है। अत: प्रतिकर्षण की घटना से यह निस्संदेह तय हो जाता है कि वस्तु आवेशित है और साथ ही किस प्रकार की विद्युत् से आवेशित है।

यदि रेशम से रगड़ी शीशे की छड़ से प्रतिकर्षण होता है, तो वस्तु धनात्मक आवेशयुक्त है और यदि ऋणात्मक आवेश वाली एबोनाइट की छड़ के साथ प्रतिकर्षण देखा जाता है, तो निश्चय ही वस्तु ऋण-आवेशित है।

1.4. घर्षण द्वारा एक प्रकार की विद्युत् (+या −) का उत्पन्न होना वस्तु विशेष का निरपेक्ष (absolute) गुण नहीं है। वरन्, रगड़नेवाली (घर्षक) और रगड़ी जानेवाली (घर्षित) दोनों वस्तुओं के आपेक्षिक (relative) गुण से ही विद्युत् की प्रकृति निर्धारित होती है। शीशे को रेशम से रगड़ने पर उसमें धनात्मक विद्युत् उत्पन्न होती है, परन्तु बिल्ली की खाल से रगड़ने पर ऋणात्मक। नीचे की तालिका में प्रत्येक वस्तु अपने से पहले वाली वस्तु से रगड़ने पर ऋणात्मक और बादवाली वस्तु से रगड़ने पर धनात्मक आवेश प्राप्त करती है।

1. बिल्ली की खाल	5. रेशम	9. लाख
2. फलालैन	6. लकड़ी	10. रेजिन
3. शीशा	7. धातुयें	11. गंधक
4. रुई	8. इंडिया रबर	12. गटापार्चा

1.5. **विद्युतीकरण के सिद्धान्त (Theories of Electrification)—**

(i) **द्वितरल सिद्धान्त (Two-fluid Theory)**—चार्ल्स फ्रैंक्वाइस डु फे (Charles Francois du Fay) और रॉबर्ट साइमर (Robert Symmer) के द्वितरल सिद्धान्त के अनुसार प्रत्येक पदार्थ में दो प्रकार की विद्युत् (+, −) के संगत दो बहुत

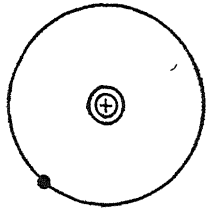
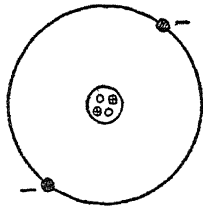
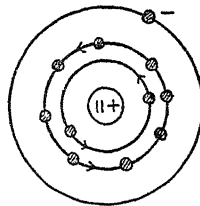
ही सूक्ष्म तरल (fluids) उपस्थित रहते हैं। सामान्य निरावेशित अवस्था में इन दोनों तरलों की मात्रा समान होती है। घर्षण की प्रक्रिया से घर्षक और घर्षित वस्तुओं में विपरीत तरलों का आदान-प्रदान होता है। घर्षक से एक तरल घर्षित में जाता है और घर्षित से दूसरा तरल घर्षक में आता है। घर्षण के बाद दोनों वस्तुओं में विपरीत प्रकार के तरलों का आधिक्य (excess) हो जाता है, जिससे दोनों पर विपरीत प्रकार की विद्युत् उत्पन्न होती है।

(ii) **एक तरल सिद्धान्त (One-fluid Theory)**—सर विलियम वाटसन (Sir William Watson) द्वारा प्रतिपादित (propounded) और बेंजामिन फ्रैंकलिन (Benjamin Franklin) द्वारा विकसित इस सिद्धान्त में केवल एक ही तरल की कल्पना की है। विद्युत् एक अविनाशी (indestructible), भारहीन (weightless) वस्तु बहुत ही सूक्ष्म (subtle) तरल है। निरावेशित वस्तुओं में यह सामान्य मात्रा में उपस्थित रहता है। यह घर्षण द्वारा एक वस्तु में सामान्य मात्रा से अधिक और दूसरी वस्तु में सामान्य मात्रा से कम हो जाता है। अतः पहली वस्तु धन-आवेशित और दूसरी ऋण-आवेशित हो जाती है।

(iii) **आधुनिक इलैक्ट्रन सिद्धान्त (Modern Electron Theory)**—वैद्युतीय घटना (Electrical Phenomenon) की व्याख्या का मूल आधार रदरफोर्ड (Rutherford) तथा बोहर (Bohr) द्वारा प्रस्तुत परमाणु की इलैक्ट्रन-रचना (Electronic Structure of Atom) है। यह सिद्धान्त ही आजकल मान्य है। प्रत्येक परमाणु तीन मौलिक कणों से मिलकर बना है—(i) प्रोटन (Proton), (ii) इलैक्ट्रन (Electron) और (iii) न्यूट्रन (Neutron)। प्रोटन (P) और न्यूट्रन (N) दोनों का भार हाइड्रोजन के परमाणु के लगभग बराबर होता है। इलैक्ट्रन (E) का भार हाइड्रोजन परमाणु का लगभग 1/1847 होता है। प्रोटन और इलैक्ट्रन आवेशित कण है, परन्तु न्यूट्रन निरावेशित। प्रोटन और इलैक्ट्रन पर क्रमशः धन और ऋण विद्युत् आवेश की बराबर मात्रा होती है।

परमाणु का केन्द्रक या नाभिक (Nucleus) प्रोटन और न्यूट्रन से मिलकर बनता है और इलैक्ट्रन नाभिक के गिर्द वृत्ताकार (circular) अथवा दीर्घ वृत्ताकार (Elliptical) कक्षाओं (orbits) में परिक्रमा करते रहते हैं। परमाणु का अर्द्धव्यास 10^{-8} सें० मी० और इलैक्ट्रन का अर्द्धव्यास 10^{-13} सें० मी० के क्रम का होता है। अतः स्पष्ट है कि परमाणु में अधिकतम भाग खाली ही है। नाभिक तो इलक्ट्रन से भी आयतन में छोटा होता है, परन्तु उसका घनत्व बहुत अधिक (कई टन प्रति घन सें० मी०) होता है। इलक्ट्रन अपेक्षाकृत हल्का है। परमाणु की पदार्थ-संहति मुख्यतः नाभिक में ही केन्द्रित रहती है।

विभिन्न परमाणुओं में मौलिक कणों की संख्या भिन्न होती है। परन्तु एक परमाणु में प्रोटन और इलैक्ट्रन संख्या में बराबर होते हैं। अतः बाहरी बिन्दुओं के लिये परमाणु सामान्य अवस्था में निरावेशित या उदासीन रहता है। प्रोटन या इलैक्ट्रन की संख्या को परमाणु क्रमांक (atomic number) कहते हैं। परमाणु की संहति मुख्यतः प्रोटन और न्यूट्रन से मिलकर बनती है, अतः दोनों की सम्मिलित संख्या को परमाणु की "संहति-क्रमांक" (mass-number) कहते हैं।

इलैक्ट्रन नाभिक के गिर्द कई कक्षाओं (orbits) अथवा कवचों (shells) में भ्रमण करते हैं। प्रत्येक कवच में इलैक्ट्रनों की अधिकतम संख्या निश्चित व भिन्न होती है। नाभिक से प्रथम, द्वितीय, तृतीय, चतुर्थ कवच को क्रमशः K, L, M, N कवच (shell) कहते हैं। इनमें क्रमशः 2×1^2, 2×2^2, 2×3^2, 2×4^2 अर्थात् 2, 8, 18, 32 से अधिक इलैक्ट्रन नहीं रह सकते। बाह्यतम (Outermost) कवच के इलैक्ट्रन संयोजकता (Valency) इलैक्ट्रन कहलाते हैं। केन्द्रक से, सबसे दूर होने के कारण, इनको नाभिक से बाँधने वाला बल बहुत निर्बल होता है। अनुकूल परिस्थिति में बड़ी आसानी से इनको मूल परमाणु से अलग किया जा सकता है। रासायनिक क्रियाओं और चालकों में विद्युत प्रवाह की प्रक्रिया को ये इलैक्ट्रन ही सम्पादित करते हैं।

हाइड्रोजन

हीलियम

सोडियम

चित्र 1

परमाणुओं की आवर्त्त तालिका (Periodic Table) परमाणु क्रमांक (Atomic Number) के चढ़ते हुए क्रम में ही उनका स्थान निश्चित किया गया है। हाइड्रोजन का पहला स्थान है, हीलियम का दूसरा, लीथियम का तीसरा, सोडियम का ग्यारहवाँ और यूरेनियम का 92 वाँ। हाइड्रोजन (H), हीलियम (He) और सोडियम (Na) के परमाणु चित्र (1) में दिखाये गये हैं—

Na	He	H
At. No.=11	At. No.=2	At. No.=1
Mass No=23	Mass No.=4	Mass No.=1
$\therefore\ P=e=11$	$\therefore\ P=e=2$	$\therefore\ P=e=1$
$N=23-11=12$	$N=4-2=2$	$N=$ Zero

विद्युत् घटना की व्याख्या—प्रत्येक वस्तु परमाणुओं से मिलकर बनी है। प्रत्येक परमाणु में धनात्मक (प्रोटन) और ऋणात्मक (इलैक्ट्रन) आवेशों की मात्रा समान होती है।

संयोजकता इलैक्ट्रन अपेक्षाकृत सुगमता से मूल परमाणु से अलग किये जा सकते हैं। अनावेशित सामान्य अवस्था में किसी भी वस्तु में प्रोटन और इलैक्ट्रन की संख्या बराबर होती है। अतः दोनों के विद्युत् आवेश परस्पर शून्यन कर देते हैं। घर्षण की प्रक्रिया में इलैक्ट्रन एक वस्तु से दूसरी में चले जाते हैं। पहली में प्रोटन (धन) की अधिकता हो जाती है और धन-विद्युत् आवेश उत्पन्न हो जाता है। दूसरी में इलैक्ट्रन (ऋण) का आधिक्य (excess) होने से ऋणात्मक विद्युत् प्रदर्शित होती है। परन्तु घर्षक और घर्षित वस्तुओं में से कौन और कितने इलैक्ट्रन खोयेगी और कौन प्राप्त करेगी यह दोनों के आपेक्षिक (relative) इलैक्ट्रन-आकर्षण (Electron affinity) से निर्धारित होता है।

1.6. **चालक (Conductors), कुचालक (Bad Conductors) तथा अचालक (Non-conductors)**—डॉ० गिलबर्ट ने धातुओं से घर्षण के प्रयोग करके देखा कि उनको किसी भी प्रकार विद्युन्मय नहीं किया जा सकता। अतः इनको गिलबर्ट ने "अवैद्युतिक" (non-electrics) कहा और जो वस्तुयें घर्षण द्वारा आवेशित हो सकती हैं उनको "वैद्युतिक" (electrics) की संज्ञा दी गई। परन्तु बाद में पता चला कि उपयुक्त सावधानी के साथ प्रयोग करने से "अवैद्युतिक" भी विद्युन्मय हो सकते हैं।

पीतल की छड़ को हाथ में पकड़ कर बिल्ली की खाल से रगड़िये और काग़ज़ के टुकड़ों के पास ले जाइये। कोई आकर्षण नहीं होगा। छड़ विद्युन्मय नहीं है। अब इसी छड़ में शीशे का एक हत्था (Handle) लगाइये। हत्थे को हाथ में पकड़ कर छड़ को खाल से रगड़िये। काग़ज़ के टुकड़ों के पास ले जाने पर इस बार टुकड़े छड़ से आकर्षित होंगे। इससे प्रकट है कि छड़ आवेशित है। पीतल की आवेशित छड़ को उँगली से छूकर काग़ज़ के टुकड़ों से छुआइये। छड़ निरावेशित (discharged) हो चुकी है। विद्युत् आवेश पीतल की छड़ के प्रत्येक भाग से निकल कर उँगली से शरीर के रास्ते पृथ्वी को चला गया। इसी कारण से हाथ में छड़ पकड़ कर घर्षण करके विद्युन्वित करने में गिलबर्ट असमर्थ रहे। शीशे का हत्था लगाने से आवेश छड़ से हाथ तक नहीं पहुँच पाता क्योंकि शीशा अपने शरीर में होकर आवेश को नहीं जाने देता। घर्षण से विद्युत् हर बार उत्पन्न होती है। हत्था पकड़ कर रगड़ने से वह छड़ में ही रुकी रहती है और हाथ में पकड़ कर घर्षण करने से हाथ के रास्ते पृथ्वी को चली जाती है।

अतः पदार्थ दो प्रकार के हुए—

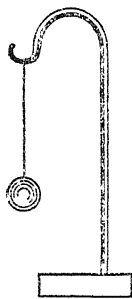
(i) **सुचालक (Good Conductor)**—जिनमें होकर विद्युत सुगमता से जा सकती है। जैसे—मानव शरीर, पृथ्वी, अम्ल (acids), क्षार (alkalies), पारा, सोना, चाँदी, ताँबा, पीतल आदि धातुएँ इत्यादि। सुचालकों के परमाणुओं के

संयोजकता इलैक्ट्रन बहुत ही आसानी से अलग होकर वस्तु के अन्तः परमाणु स्थान में गैस कणों की भाँति भटकते रहते हैं।

(ii) **अचालक (Non Conductor)**—वे वस्तुएँ हैं जिनमें होकर विद्युत नहीं जा सकती। उदाहरणतः गंधक, तेल, काँच, एबोनाइट, गंदाविरोजा (Resin), रबर, वायु आदि दो चालकों के बीच एक अचालक लगा कर दोनों के आवेश पृथक् किये जा सकते हैं। अतः इनको "पृथक्कारी" (insulators) भी कहते हैं। अचालकों के परमाणुओं के संयोजकता इलैक्ट्रन मूल परमाणु से दृढ़ता से बँधे रहते हैं और अलग नहीं किये जा सकते।

(iii) **कुचालक (Bad Conductors)**—सुचालक और अचालकों के बीच कुछ ऐसे पदार्थ हैं जो विद्युत को जाने तो देते हैं, परन्तु उसके मार्ग में ऊँचा प्रतिरोध प्रस्तुत करते हैं। संगमरमर, कागज़, लकड़ी आदि ऐसे ही पदार्थ हैं। इनको आंशिक (Partial) चालक भी कह सकते हैं। कुचालकों के संयोजकता इलैक्ट्रन मूल परमाणु से अलग तो हो जाते हैं, परन्तु हटाने के लिये ऊँचा बल चाहिये।

1.7. **विद्युत्दर्शी (Electroscope)**—वह यन्त्र है, जिससे विद्युत् आवेश की उपस्थिति और प्रकार (धन या ऋण) का निर्णय हो सके। जब इसी उपकरण में एक पैमाना लगा दिया जाता है जिससे उपस्थित आवेश की मात्रा का मापन भी हो सके, तो इसका नाम विद्युत्मापी (Electrometer) हो जाता है। विद्युत्दर्शी दो प्रकार के होते हैं—(i) पिथ-गेंद विद्युत्दर्शी, (ii) स्वर्ण-पत्र विद्युत्दर्शी।

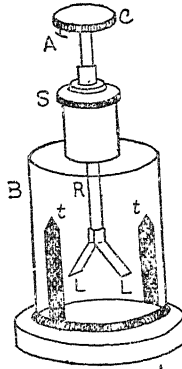
(i) पिथ-गेंद विद्युत्दर्शी (चित्र 2)—सरकंडे के गूदे को पिथ (Pith) कहते हैं। थोड़ा-सा पिथ लेकर उसकी गेंद बना ली जाती है। गेंद को रेशम के डोरे की सहायता से एक स्तम्भ (Stand) से लटका दिया जाता है। हल्की होने के कारण विद्युतीय आकर्षण या प्रतिकर्षण का थोड़ा-सा बल ही इसको इधर-उधर चला सकता है।

चित्र 2

आवेश की उपस्थिति—एक विद्युन्मय छड़ गेंद के पास लाइये। गेंद छड़ को छूने के लिये दौड़ेगी (आकर्षण)। वास्तविक स्पर्श के थोड़ी ही देर बाद वह दूर भाग जायेगी। छड़ को आगे बढ़ाने से गेंद और दूर हटेगी (विकर्षण)। छड़ को स्पर्श करने से गेंद उसी प्रकार के आवेश से विद्युन्वित होकर प्रतिकर्षित (repel) होती है। निरावेशित छड़ को पास लाने से गेंद निश्चल लटकी रहती है।

आवेश की प्रकृति या प्रकार—पहली भाँति स्पर्श कराके संचालन (conduction) की क्रिया से गेंद को धन-आवेशित कर दो। प्रायोगिक छड़ को गेंद के समीप लाइये। यदि प्रतिकर्षण होता है, तो छड़ पर धन-आवेश है। आकर्षण के होने से यह निश्चय

नहीं कहा जा सकता कि छड़ निरावेशित है अथवा ऋण-आवेशित। अब दूसरे पिथ-गेंद विद्युतदर्शी को ऋण-आवेशित कीजिये और प्रायोगिक छड़ को निकट ले जाइये। विकर्षण है, तो छड़ ऋण-आवेशित है: और यदि इस बार भी आकर्षण होता है, तो निरावेशित।

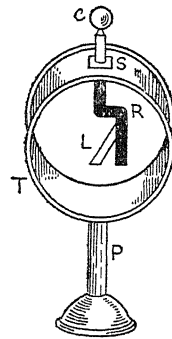
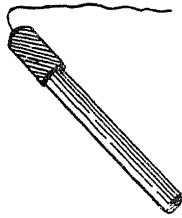
प्रतिकर्षण ही आवेश-प्रकार का सच्चा निर्णायक है।

(ii) **स्वर्ण-पत्र विद्युतदर्शी (Gold Leaf Electroscope)**—(चित्र-3) धातु की छड़ R के निचले सिरे पर दो स्वर्ण-पत्र (बर्क़) L,L चिपके हैं और ऊपरी सिरे पर वृत्ताकार धातु प्लेट C लगी है जिसमें A एक पेंच लगा है। शीशे के जार B के मुँह में एक पृथक्कारी (Insulator) रबर या गंधक की डाट (कार्क) S में होकर छड़ R आर-पार जाती है। स्वर्ण-पत्रों (L,L) के सामने जार की दीवारों में t,t दो टीन के पत्र लगे हैं जो नीचे जार की धातु-मय (metallic) तली तक जाते हैं। धातु तला पृथ्वी से सम्बन्धित रहता है। जार की वायु को शुष्क करने के लिये कैल्शियम क्लोराइड अथवा तेज गंधकाम्ल में भिगोकर झामक (Pumice Stone) रख देते हैं।

चित्र 3

चित्र 4 में एक सुग्राही विद्युत्दर्शी प्रदर्शित है। अचालक स्तम्भ P पर लगे एक धातु के छल्ले T के ऊपर पृथक्कारी कार्क S में होकर धातु की छड़ R जाती है। उसके ऊपरी सिरे पर धातु की घुंडी (Knob) C और नीचे स्वर्ण-पत्र L लगा है। वायु झोंकों से बचाने के लिये छल्ले के दो ओर शीशा लगा देते हैं।

चित्र 4

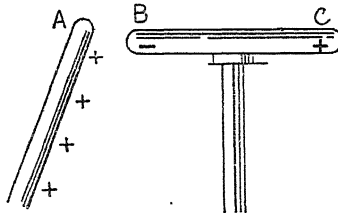
आवेश उपस्थिति की पहचान—प्रायोगिक वस्तु को विद्युत्दर्शी की घुंडी के पास धीरे-धीरे लाइये। यदि वस्तु विद्युन्मय है, तो स्वर्ण-पत्र परस्पर फैल जायेंगे।

आवेश-प्रकृति की जाँच—पीतल की छड़ (अचालक हत्था पकड़ कर) को फलालैन से रगड़ कर ऋण-आवेशित कीजिये। विद्युत्दर्शी की घुंडी के पास धीरे-धीरे ले जाकर छुआइये और हटा लीजिये। स्वर्ण-पत्र ऋण-आवेशित होकर फैल गये हैं। अब प्रायोगिक वस्तु को धीरे-धीरे घुंडी के निकट लाइये। स्वर्ण-पत्रों का फैलाव यदि बढ़ता जाय तो वस्तु पर ऋण आवेश है। पत्रों का फैलाव यदि घटने लगे तो वस्तु निरावेशित भी हो सकती है और धन-आवेशित भी। उँगली से छूकर विद्युत्दर्शी को निरावेशित कर दीजिये। पीतल की छड़ को गंधक से रगड़ने के बाद घुंडी से छूकर विद्युत्दर्शी को धन आवेशित कर दीजिये। इस बार

प्रायोगिक वस्तु को समीप लाने से भी यदि पत्रों का फैलाव कम होता है, तो वस्तु निरावेशित है। और यदि अब पत्रों में फैलाव बढ़ने लगे तो वस्तु धन-आवेशित है।

चित्र 5

1.8. **घर्षण से विपरीत प्रकार की बराबर विद्युत् की उत्पत्ति**—शीशे की छड़ के सिरे पर एक ढीली रेशम की टोपी पहना कर खूब रगड़िये। शीशे से इलैक्ट्रन निकल कर टोपी में चले जायेंगे। छड़ पर धन और टोपी पर ऋण आवेश प्रकट होगा। टोपी पहिनाये हुए छड़ को विद्युत्दर्शी के पास ले जाइये। कोई प्रभाव नहीं होगा। अब अकेली छड़ को ले जाइये, पत्र फैलते जायेंगे। स्पर्श करने से फैलाव अधिकतम होगा। फैलाव को नाप लीजिये अथवा केवल अन्दाज कर लीजिये। उँगली से छूकर निरावेशित करने के बाद पुनः टोपी लाकर स्पर्श कराइये। अब की बार पत्र ऋण विद्युत् के कारण फैल जायेंगे। नापने पर यह फैलाव छड़ के धन आवेश के फैलाव के बिल्कुल बराबर होगा।

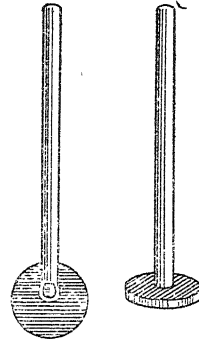
टोपी और छड़ को मिलाने पर परस्पर शून्यीकरण उत्पन्न करने और उनके अलग-अलग फैलाव के बराबर होने से स्पष्ट है कि घर्षण की प्रक्रिया में धन और ऋण विद्युत् समान मात्रा में उत्पन्न होती हैं।

इलैक्ट्रन सिद्धान्त से तो यह बात बिल्कुल स्पष्ट हो जाती है। एक वस्तु जितने इलैक्ट्रन खोती है दूसरी वस्तु ठीक उतने ही प्राप्त करती है। अतः पहली का धन आवेश दूसरी के ऋण आवेश के बराबर होगा।

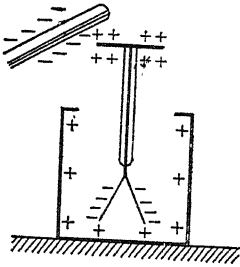
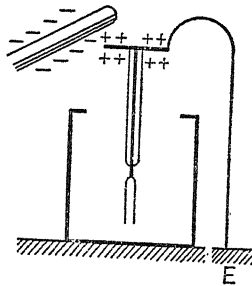
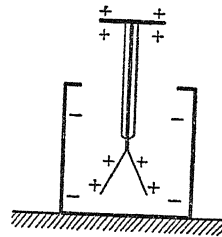
1.9. **स्थिर वैद्युतिक उपपादन अथवा प्रेरण (Electro-Static Induction)**—वास्तविक स्पर्श के बिना ही केवल विद्युन्मय वस्तु की उपस्थितिमात्र से ही विद्युतीकरण (electrification) की प्रक्रिया को **स्थिर वैद्युतिक प्रेरण** कहते हैं। चुम्बकत्व में इसके संगत "चुम्बकीय प्रेरण" की घटना है।

चित्र 6

पृथक्कृत (insulated) निरावेशित धातु की छड़ $B\ C$ के निकट धन-आवेशित छड़ A लाइये। (चित्र 6)। $B\ C$ के इलैक्ट्रन A से आकर्षित होकर B सिरे पर एकत्रित होने का प्रयत्न करेंगे। इससे C सिरे पर सामान्य अवस्था की अपेक्षा इलैक्ट्रन का घनत्व कम हो जायेगा। अतः B सिरे पर ऋण और C पर धन-आवेश प्रकट होगा।

आवेश-प्रकार की जाँच के लिये **प्रमाण पट्टिका** (Proof Plane) (चित्र 7) प्रयुक्त होती है। धातु की प्लेट में आबनूस या शीशे (अचालक) का हत्था लगा कर "प्रमाण पट्टिका" वनती है।

A की उपस्थिति में ही *B* और *C* सिरों को "प्रमाण पट्टिका" से छूकर विद्युत्दर्शी की सहायता से आवेश की जाँच कीजिये। *B* पर ऋण और *C* पर उसी के बराबर धन आवेश मिलेगा।

चित्र 7

आवेशित और निरावेशित वस्तुओं में आकर्षण—प्रेरण की घटना से यह स्पष्ट हो जाता है कि एक आवेशित वस्तु को पास लाने से निरावेशित वस्तु के निकटतम सिरे पर विपरीत विद्युत् उत्पन्न होती है। इसके परिणाम स्वरूप दोनों में आकर्षण होता है। अतः विद्युतीय आकर्षण का मूल कारण प्रेरण है।

स्वर्ण पत्र विद्युत् दर्शी को प्रेरण द्वारा आवेशित करना—मान लीजिये विद्युत दर्शी को धन-आवेशित करना है। अचालक हत्था लगी पीतल की ऋण-आवेशित (फलालैन से रगड़कर) छड़ को धीरे-धीरे विद्युत् दर्शी की घुंडी के पास लाइये और उसके थोड़ी दूर पर स्थिर कर दीजिये। धातु की घुंडी, छड़ और स्वर्णपत्र सब मिलकर

8 (a) चित्र 8 (b) 8 (c)

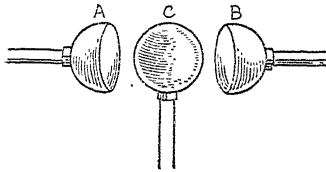
अकेले सुचालक की तरह व्यवहार करेंगे। प्रेरण की क्रिया से घुंडी पर धन और पत्रों में ऋण आवेश प्रकट होगा। समान आवेश के कारण दोनों पत्र चौड़े हो जायेंगे। पत्रों के ऋण आवेश की प्रेरण क्रिया से जार में लगे टीन के पत्रों पर अन्दर के तल पर धन और बाहरी तल पर ऋण आवेश उत्पन्न होता। अन्दर का आवेश तो पत्रों के आवेश से सम्बद्ध (Bound) है परन्तु बाहरी तल का ऋणावेश मुक्त (Free) है। अतः वह धातु की पदी से होकर पृथ्वी में चला जायेगा। यह दशा चित्र 8(a) में

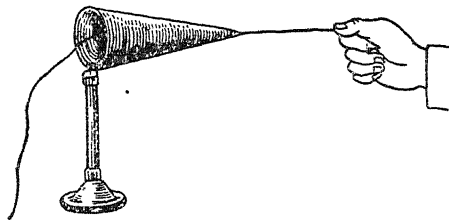
व्यक्त है। घुंडी पर धन पत्रों में ऋण और टीन पत्रों में धन आवेश है। टीन पत्रों का आवेश स्वर्ण पत्रों के फैलाव को और भी बढ़ा देता है।

प्रेरक पीतल की छड़ (A) की उपस्थिति में ही घुंडी को पृथ्वी से जोड़ दीजिये। घुंडी का सम्बद्ध (Bound) आवेश तो छड़ के आकर्षण से रुका रहता है, परन्तु स्वर्ण पत्रों का मुक्त आवेश (Free charge) पृथ्वी को चला जाता है। स्वर्ण पत्र सुकड़ जाते हैं और टीन पत्रों का बद्ध (bound) आवेश भी आकर्षक आवेश (स्वर्ण पत्रों पर) की अनुपस्थिति में मुक्त होकर पृथ्वी को चला जाता है। या यूँ कहिये कि पृथ्वी से इलैक्ट्रन आकर टीन पत्रों के आवेश का शून्यन कर देते हैं। चित्र 8 (b).

पीतल की छड़ (प्रेरक) को हटाने से पहले ही पृथ्वी का सम्बन्ध घुंडी से तोड़ दीजिये और फिर छड़ को हटा लीजिये। घुंडी का धनावेश स्वर्ण पत्रों तक फैल जाता है। स्वर्ण पत्र फिर फैल जाते हैं और टीन पत्रों पर इस बार ऋण-आवेश प्रकट होता है। चित्र 8 (c).

ध्यान रहे कि घुंडी का सम्बंध जोड़ने के बाद प्रेरक छड़ की उपस्थिति ही में तोड़ देना चाहिये।

1.10. **सुचालक में आवेश का स्थान (Seat of the charge on a conductor)**—विद्युत आवेश सदैव सुचालक के वाह्यतम (Outermost) धरातल पर रहता है। इसके लिये बॉयट और फैरेडे (Faraday) ने निम्न प्रयोग किये—

चित्र 9

1. **बायो (Biot) का प्रयोग**—पृथक्कृत धातु के गोले C को रगड़ कर आवेशित कीजिये। अब अचालक हत्थों से पकड़ कर धातु के अर्द्धगोलों A, B को C पर रखिये ताकि वे C को पूरा-पूरा ढक कर स्पर्श करें। A और B को स्वर्ण पत्र विद्युतदर्शी के पास बारी-बारी से ले जाइये दोनों आवेशित हैं। C की जाँच करने से बिल्कुल निरावेशित पाया जाता है। आवेश C से हट कर A और B पर आगया क्योंकि स्पर्श करने पर A,B,C के संयुक्त चालक की वाह्यतम सतह A और B अर्द्ध गोलों का तल ही है।

चित्र 10

2. **फैरेड का तितली के जाल का प्रयोग**—अचालक स्तम्भ पर लगे पीतल के छल्ले में एक सूत का शंक्वाकार

जाल लगाइये। जाल के शीर्ष में दोनों ओर एक-एक रेशम का डोरा बांध दीजिये। डोरों की सहायता से जाल को पलटा जा सकता है। अब घर्षण से जाल को आवेशित कीजिये।

प्रमाण पट्टिका से छूकर विद्युतदर्शी की सहायता से जाल के भीतरी और बाहरी तलों की परीक्षा कीजिये। आवेश केवल बाहरी धरातल पर मिलेगा। अन्दर वाले रेशम के डोरे को बाहर खींच कर जाल का भीतरी तल बाहर और बाहरी सतह अन्दर कर दीजिये। प्रमाण पट्टिका से पुनः परीक्षण कीजिये। आवेश फिर उस धरातल पर मिलेगा जो अब बाहर है और पहले अन्दर था।

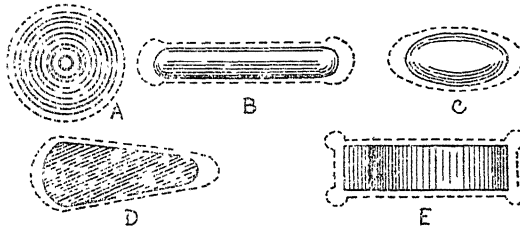
इन प्रयोगों से स्पष्ट है कि आवेश सदैव सुचालक के बाहरी तल पर स्थित रहता है।

1.11. **क्षेत्र आवेश घनत्व (Surface charge density)**—दिया हुआ विद्युत आवेश चालक के समस्त धरातल पर वितरित (distributed) हो जाता है। किसी बिन्दु को घेरने वाले इकाई क्षेत्रफल पर आवेश की मात्रा उस बिन्दु पर "क्षेत्र आवेश-घनत्व" के बराबर होती है। आवेश वितरण (distribution) यदि समरूप (uniform) नहीं है तो बिन्दु विशेष के गिर्द केवल उस सूक्ष्म क्षेत्रफल पर विचार करते हैं जिस पर वितरण समरूप माना जा सके। मान लीजिये वह मौलिक क्षेत्रफल 'A' वर्ग सें० मी० है और A पर कुल आवेश Q है तो आवेश घनत्व

$$\sigma = \frac{Q}{A} \text{ होगा।}$$

एक गोलाकार चालक को दिये हुये आवेश का वितरण समरूप होता है (चित्र 11 a)। यदि गोले का अर्द्ध व्यास r सें० मी० और दिया हुआ आवेश Q हो। तो,

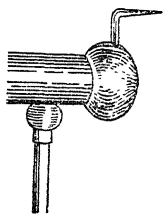
चित्र 11

कुल क्षेत्रफल $= 4\pi r^2$

$$\text{और क्षेत्र आवेश घनत्व } \sigma = \frac{Q}{4\pi r^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

अब वक्रता की त्रिज्या का विलोम ही धरातल की वक्रता की माप है। अतः समीकरण (1) से स्पष्ट है कि आवेश का क्षेत्र घनत्व (surface density) बिन्दु विशेष पर सुचालक के धरातल की वक्रता के वर्ग के समानुपात में होता है।

जिन चालकों के धरातल की वक्रता असमान है आवेश-घनत्व भी असमान होगा। क्योंकि मोड़ों या नुकीले विन्दुओं पर वक्रता बहुत अधिक होती है, वहाँ पर आवेश

घनत्व भी अधिक होगा। चित्र 11 में विभिन्न आकृतियों के चालकों पर सामान्य अवस्था में आवेश का वितरण दिखाया गया है। लगातार रेखा चालक की सीमा है। बिन्दुदार रेखा और लगातार रेखा के बीच की अभिलम्ब दूरी स्थानीय आवेश क्षेत्र-घनत्व के अनुपात में है। चालकों को आवेशित करके, प्रमाण पट्टिका से छू छूकर विद्युत्दर्शी की पत्तियों के फैलाव को नाप कर ये चित्र बनाये गये हैं।

1.12. **नुकीले भागों की क्रिया—विद्युत् पवन (Electric Wind)**—गत धारा से हमने देखा कि चालक के जिस स्थान पर वक्रता अधिक होगी आवेश घनत्व भी अधिक होगा। नुकीले भागों पर वक्रता अर्द्ध व्यास बहुत कम परन्तु वक्रता अत्यधिक होती है। अतः इन स्थानों पर आवेश घनत्व भी असाधारणतया अधिक होगा। इससे पास वाले वायुकण स्पर्श करके संचालन (conduction) की प्रक्रिया से आवेशित हो कर विकर्षित हो जायेंगे। उनका स्थान लेने के लिये दूसरे अणु आयेंगे और फिर आवेशित होकर प्रतिकर्षित होंगे। इस प्रकार विद्युत आवेश का वायु में चूना (leak) जारी रहेगा और वायु कण एक धारा के रूप में बहते रहेंगे। इस "वायु धारा" को **विद्युत् पवन** (Electric Wind) कहते हैं।

चित्र 12

उदाहरण के लिये किसी घर्षण मशीन के प्रधान चालक (Prime conductor) पर एक मुड़ा हुआ पिन लगा कर मशीन को चलाइये। थोड़ी देर बाद एक जलती हुई मोमबत्ती की लौ पिन के सामने लाइये। "विद्युत पवन" के कारण बत्ती की लौ पिन से दूर झुक जायेगी।

सारांश

विद्युत आवेश दो प्रकार का होता है—धनात्मक और ऋणात्मक।

शीशे की छड़ को रेशम से रगड़ने से शीशे पर धन आवेश उत्पन्न होता है। और फलालैन के घर्षण से एबोनाइट की छड़ पर ऋण आवेश प्रकट होता है।

समान आवेशों से विद्युन्मय वस्तुओं में विकर्षण और असमान आवेशों से विद्युन्वित वस्तुओं में आकर्षण होता है। आवेशित वस्तु निरावेशित वस्तु को आकर्षित करती है। अतः विकर्षण ही वैद्युतीकरण की सच्ची जांच है।

किसी वस्तु को आवेशित करने के तीन ढंग हैं—(i) घर्षण द्वारा (ii) संचालन (conduction) से (iii) प्रेरण (induction) से। पहली दो विधियों में स्पर्श आवश्यक है परन्तु प्रेरण से ही होता है।

आवेश चालक के वाह्यतम तल पर ही रहता है।

जहाँ पर वक्रता अधिक होती है आवेश का घनत्व बढ़ जाता है। बिन्दुओं, नोकों पर अधिकतम आवेश रहता है।

वैद्युत् घटना की व्याख्या आधुनिक इलैक्ट्रन सिद्धान्त से भली भाँति होती है। इस सिद्धान्त के अनुसार प्रत्येक परमाणु की ही वैद्युत प्रकृति है। परमाणु के केन्द्र पर धन आवेश होता है और उसके गिर्द ऋण-आवेशित कण इलैक्ट्रन चक्कर लगाते है।

घर्षण के समय इलैक्ट्रन एक वस्तु से दूसरी में चले जाते है। अतः पहली पर धन और दूसरी पर बराबर ऋण आवेश प्रकट होता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. विद्युत् कौन-कौन प्रकार की होती है। स्वर्ण पत्र विद्युत् दर्शी का वर्णन कीजिये और बताइये कि इसकी सहायता से आप कैसे पता लगायेंगे कि अमुक वस्तु आवेशित है या नहीं। और यदि आवेशित है तो कैसी।
2. इलैक्ट्रन सिद्धान्त को समझाइये। परमाणु क्रमांक और संहति-क्रमांक से आप क्या समझते हैं? इस सिद्धान्त के आधार पर वैद्युत प्रेरण और घर्षण द्वारा विद्युतीकरण की व्याख्या कीजिये।
3. सुचालक, कुचालक और अचालक पदार्थों में परस्पर क्या भेद है? विद्युन्मय होने के बाद चालक में आवेश कहाँ रहता है? उपयुक्त प्रयोग का विवरण दीजिये।
4. आवेश क्षेत्र घनत्व से आप क्या समझते हैं? विद्युत-पवन की उत्पत्ति पर प्रकाश डालिये।
5. यदि किसी आवेशित आबनूस की छड़ को किसी विद्युद्दर्शक के संस्पर्श में रखा जाय, तो पत्तियां फैलती हैं, और उसे हटाने पर वे आंशिक रूप से सिकुड़ जाती हैं। इसे समझाइये।
6. यह किस प्रकार सिद्ध करोगे कि जब कोई पृथग्न्यस्त (insulated) चालक, प्रेरण द्वारा आविष्ट होता है, तो उस पर दो विपरीत आवेश प्रेरित होते हैं, जो आवेश, प्रेरक आवेश से दूर होता है, वह उसी प्रकार का होता है।

   किन परिस्थितियों में पूरा आवेश, दूसरे पृथग्न्यस्त (insulated) चालक को स्थानान्तरित किया जा सकता है?
7. विद्युत्-स्थैतिक (electrostatic) प्रेरण, चुंबकीय प्रेरण से किस प्रकार भिन्न होता है। प्रत्येक स्थिति में किसी उपकरण को प्रेरण के प्रभाव से कैसे बचाओगे?
8. किसी बिन्दु पर आवेश का क्षेत्र घनत्व किन बातों पर आधारित होता है? यह चालक की आकृति पर किस प्रकार निर्भर होता है?

   कई सेलों की बैटरी का एक ध्रुव पृथ्वी से संबद्ध किया जाता है। बैटरी के दूसरे छोर से दो पृथग्न्यस्त धातु की गेंदें, (जिन के व्यास क्रमशः 1 और 5 सें० मी० हैं) एक के पश्चात् दूसरी व्यवस्थित की जाती हैं। गेंदों पर आवेश के घनत्वों की तुलना कीजिए। **(उत्तर, 5 : 1)**

अध्याय 2

वैद्युत-क्षेत्र और विभव

(Electric Field and Potential)

2.1. **वैद्युत-क्षेत्र (Electric Field)**—आवेशित वस्तु के सब ओर वह स्थान है जो वैद्युत प्रभाव से प्रभावित हो ; व्यवहार में वस्तु के सब ओर वह स्थान जिसमें वैद्युत आकर्षण या प्रतिकर्षण का बल उपयुक्त उपकरण से ज्ञात किया जा सकता है वस्तु के आवेश का वैद्युत क्षेत्र समझा जाता है।

2.2. **विद्युतीय क्षेत्र की तीव्रता (Intensity)**—क्षेत्र के किसी बिन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता उस बल से नापी जाती है जो बिन्दु विशेष पर स्थित धन विद्युत एकांक (unit positive charge) पर कार्य करता है। तीव्रता एक दिष्ट राशि है। इसकी दिष्ट संगत बल की दिशा ही होती है और परिमाण बल के परिमाण के बराबर। परन्तु इकाई विभिन्न हैं। वैद्युत क्षेत्र की तीव्रता की इकाई के लिये कोई विशेष नाम नहीं हैं। जिस बिन्दु पर इकाई धन आवेश x डाइन का बल अनुभव करे वहाँ पर क्षेत्र की तीव्रता x स्थिर विद्युत इकाई (Electro Static Unit) होगी।

2.3. **कूलम्ब के नियम (Coulomb's Laws)**—विद्युतीय आवेशों के बीच कार्य करने वाले बल की मात्रीय (quantitative) विवेचना सर्वप्रथम फ्रांस के वैज्ञानिक कूलम्ब ने की थी। बल एक दिष्ट राशि है अतः उसकी दिशा और परिमाण दोनों पर विचार करना चाहिये।

दिशा—दो बिन्दु आवेशोंका बल मिलानेवाली ऋजुरेखाकी दिशामें कार्य करता है। परिमाण के लिये कूलम्ब ने दो उप नियम दिये।

(i) निश्चित दूरी पर स्थित दो बिन्दु आवेशों के बीच बल उनकी मात्रा (quantity) के गुणन फल के समानुपाती होता है।

(ii) दिये हुए दो बिन्दु आवेशों का बल उनकी दूरी के वर्ग का व्युत्क्रमानुपाती होता है।

यदि q_1 और q_2 दो बिन्दु आवेश परस्पर d सें० मी० दूर हैं तो पहले उपनियम से उनके बीच का बल,

$$F \propto q_1 \, q_2 \qquad \text{यदि } d \text{ स्थिर रहे}$$

और दूसरे उपनियमानुसार,

$$F \propto \frac{1}{d^2} \qquad \text{यदि } q_1, \; q_2 \text{ स्थिर हों।}$$

दोनों को मिलाने से,

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{d^2}$$ यदि q_1, q_2 और d सब बदलें।

अथवा $$F = \frac{1}{K}\frac{q_1 q_2}{d^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

यहाँ K एक नियतांक (constant) है जिसका मान इकाई प्रणाली (स० ग० स०, फ० प० स०) तथा मध्यवर्ती माध्यम पर निर्भर करता है। इसको माध्यम की विशिष्ट प्रेरण सामर्थ्य (Specific Inductive Capacity) अथवा पार विद्युत नियतांक (Dielectric Constant) कहते हैं। वायु के लिये $K=1$ होता है।

इकाई आवेश (Unit charge)—समीकरण (2) में

$q_1 = q_2 = q$, $d=1$, $K=1$ और $F=1$ रखिये।

$$1 = 1/1 \times \frac{q \times q}{1^2}$$

या $q^2 = 1$

$\therefore$ $q^2 = \pm 1$ हो जाता है।

अतः स० ग० स० प्रणाली में स्थिर विद्युत इकाई आवेश (Electro Static Unit charge) सजातीय और बराबर आवेश से 1 सें० मी० दूर वायु में स्थित होने पर एक डाइन के बल से प्रतिकर्षित होता है।

विद्युत आवेश की व्यवहारिक इकाई कूलम्ब है। और

1 कूलम्ब $= 3 \times 10^9$ स्थिर वि० एकांक

विन्दुआवेश के क्षेत्र की तीव्रता—परिभाषा के अनुसार K पार विद्युत नियतांक के माध्यम में d सें० मी० की दूरी पर q, *e. s. u.* के बिन्दु आवेश के विद्युतीय क्षेत्र की तीव्रता

$I = F$ होगी

जबकि समीकरण (2) में $q_2 = +1$, $q_1 = q$ रखा जाय।

अतः $$I = \frac{1}{K} \cdot \frac{q \times 1}{d^2}$$

$$= \frac{1}{K} \cdot \frac{q}{d^2} \; e.\,s.\,u.$$

2.4. **विद्युतीय बल रेखा (Electric Line of Force)**—चुम्बकीय बल रेखाओं के समान विद्युतीय बल रेखा विद्युतीय क्षेत्र में खींचा गया वह चिकना लगातार काल्पनिक वक्र है जिसपर स्वतंत्र धन आवेश चलता है या चलने को प्रवृत्त होता है। धन आवेश की गति की दिशा ही उसकी धनात्मक दिशा है।

विद्युतीय बल रेखा के किसी भी विन्दु पर खींची गई स्पर्श रेखा बिन्दु विशेष पर क्षेत्र की तीव्रता की दिशा बताती है।

गुण (Properties) :

(i) प्रत्येक बल रेखा धन आवेश से चलकर ऋण आवेश पर समाप्त होती है।

(ii) खिंची हुई कमानी की भाँति प्रत्येक बल रेखा लम्बाई की दिशा में सिकुड़ने का प्रयत्न करती है जिससे उसके दोनों सिरों पर स्थित विपरीत आवेशों में आकर्षण होता है।

(iii) एक ही दिशा में जाने वाली पास-पास की बल रेखाओं में प्रतिकर्षण होता है। समान आवेशों का प्रतिकर्षण इसी का परिणाम है।

(iv) प्रत्येक इकाई धन आवेश से $4\pi/K$ बल रेखायें उत्पन्न होती हैं और प्रत्येक इकाई ऋण आवेश पर $4\pi/K$ रेखायें विलीन होती हैं।

(v) आवेशित वस्तु के तल से अभिलम्ब मिलती है।

(vi) दो बल रेखायें परस्पर काट नहीं सकतीं। क्योंकि कटान विन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता दो दिशाओं में होगी जो असंगत है।

2.5. चुम्बकीय बल रेखाओं से अन्तर—

(i) जब कि चुम्बकीय बल रेखायें चुम्बकित वस्तु के तल पर कोई भी कोण बना सकती हैं, विद्युतीय बल रेखायें विद्युन्मय तल से 90° के कोण पर मिलती है।

(ii) विद्युन्वित पदार्थ के अन्दर कोई बल रेखा नहीं होती अतः वे बन्द वक्र नहीं है। परन्तु चुम्बकीय बल रेखायें चुम्बक के अन्दर भी चलती हैं और एक बन्द वक्र बनाती हैं। बाहर उत्तरी ध्रुव से दक्षिणी और चुम्बक के अन्दर दक्षिणी से उत्तरी ध्रुव को मिलाकर चुम्बकीय बल रेखायें चक्कर पूरा कर लेती हैं। विद्युतीय बल रेखायें धन आवेश से चलकर ऋण आवेश पर आकर ही समाप्त हो जाती है।

2.6. बल रेखाओं द्वारा क्षेत्र की तीव्रता व्यक्त करना—एक इकाई धन आवेश से K पार विद्युत् नियतांक के माध्यम में $4\pi/K$ बल रेखायें सब ओर समरूप में (symmetrically) वितरित और त्रिज्यीय (Radial) निकलती है। आवेश को केन्द्र मान कर 1 सें० मी० की त्रिज्या का एक गोला (Sphere) खींचिये। गोले की परिधि के प्रत्येक विन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता $1/K$ *e.s.u.*. होगी। अब गोले के धरातल का कुल क्षेत्रफल $=4\pi\times1^2=4\pi$ वर्ग सें० मी०

और कुल रेखाओं की संख्या $=4\pi/K$.

$\therefore$ बल रेखाओं का क्षेत्र घनत्व $=\dfrac{4\pi}{K}/4\pi$

$=1/K$ बल रेखा प्रति वर्ग सें० मी०

वायु में $K=1$, तीव्रता $=1$ *e.s.u.*.

और बल रेखाओं का क्षेत्र घनत्व (Surface Density)

$=1$ बल रेखा प्रति वर्ग० सें० मी०

q $e.s.u.$ आवेश से, r सें० मी० की दूरी पर तीव्रता $= q/Kr^2$ $e.s.u.$

r सें० मी० त्रिज्या के गोले का कुल क्षेत्रफल $= 4\pi r^2$ वर्ग० सें० मी०

निकलने वाली कुल बल रेखायें $= 4\pi/K \times q$

गोले के तल पर 1 वर्ग सें० मी० क्षेत्रफल से गुजरने वाली बल रेखाओं की संख्या

$$= 4\pi/K \times q/4\pi r^2 = 1/K.\ q/r^2$$

स्पष्ट है कि प्रत्येक दशा में तीव्रता का परिमाण (Magnitude) बल रेखाओं की उस संख्या के बराबर है जो विन्दु विशेष पर रेखाओं के अभिलम्ब स्थित 1 वर्ग सें० मी० क्षेत्र से गुज़रती हैं।

2.7. **बल नलिकायें**—बल रेखायें खींच कर क्षेत्र का चित्रण एक प्रकार से अपूर्ण है क्योंकि एक इकाई आवेश से $4\pi/K$ बल रेखायें निकल कर सब ओर के स्थान को पूर्ण रूप से लगातार विच्छेदित नहीं करती। बहुत सा ऐसा स्थान बच जाता है जिससे कोई बल रेखा नहीं गुज़रती। जहाँ से कोई बल रेखा न गुज़रे वहाँ पर क्षेत्र भी शून्य होना चाहिए। यह असंगत है।

इस अपूर्णता को दूर करने के लिये फैरेडे ने बल नलिकाओं की कल्पना की। (i) प्रत्येक इकाई आवेश से एक बल नलिका निकल कर एक इकाई आवेश पर समाप्त होती है।

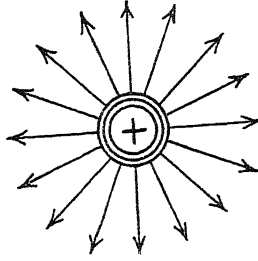
(ii) प्रत्येक बल नलिका में $4\pi/K$ बल रेखायें समरूप से वितरित रहती हैं।

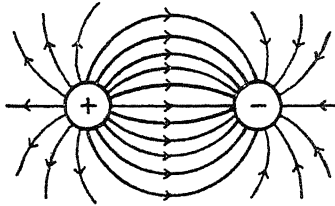
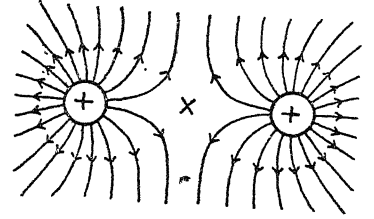
(iii) प्रत्येक बल नलिका की अक्ष की दिशा में तनाव (Tension) और उसके समकोणिक (Right Angles) दिशा में चॉप (stress) बाहर की ओर कार्य करता है। तनाव के कारण बल नलिकायें सुकड़ना चाहती हैं जिससे ऋण और धन आवेश एक दूसरे की ओर खिंचते हैं [विद्युतीय आकर्षण]। समकोणिक चॉप के कारण पास-पास की बल नलिकाओं में विकर्षण होता है। [विद्युतीय विकर्षण]

(iv) दोनों सिरों पर स्थित विपरीत आवेशों से हटकर जैसे-जैसे हम आगे बढ़ते हैं (दोनों सिरों से अन्दर को) नलिका का अनुप्रस्थ क्षेत्र (Cross-sectional area) बढ़ता जाता है। अतः बल रेखाओं का क्षेत्र घनत्व घटता जाता है क्योंकि प्रत्येक नलिका में कुल बल रेखाओं की संख्या तो निश्चित ($4\pi/K$) है। यही कारण है कि आवेशों से दूर तीव्रता घटती है।

(v) मैक्सवैल (Maxwell) ने कल्पना की कि प्रत्येक इकाई आवेश से $4\pi/K$ बल नलिकायें सम्बन्धित हैं। इस प्रकार प्रत्येक नलिका में केवल एक बल रेखा होती है जो नलिका की अक्ष की दिशा में होती है। इन नलिकाओं को मैक्सवैल बल नलिकाएँ (Maxwell Tubes of Force) कहते हैं।

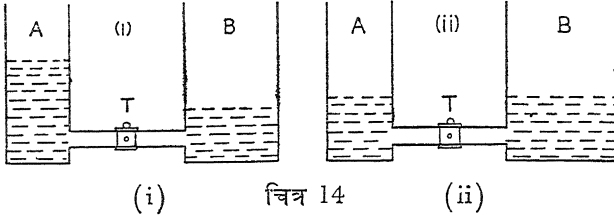
2.8. **बल रेखाओं का खींचना**—विद्युतीय क्षेत्र में रखी हुए समतल शीशे की प्लेट पर एक बहुत ही हल्की वस्तु जैसे जिप्सम साल्ट समान रूप से छिड़क देते हैं। अब प्लेट पर उँगली से कट-कट की हल्की चोट देने से बिखरी हुई वस्तु के कण प्रेरण

द्वारा विद्युन्वित होने के कारण अपने को नियमित और व्यवस्थित रेखाओं में संयोजित कर लेते हैं। ये व्यवस्थित रेखाएँ ही विद्युतीय वल रेखायें हैं। नीचे के चित्र 13 में विद्युतीय वल रेखाओं के विभिन्न मानचित्र प्रदर्शित हैं। आवेश की मात्रा के अनुपात में प्रत्येक आवेश से बल रेखाओं की संख्या सम्बन्धित है। चित्र–13 (i) का आवेश 16 और चित्र 13 (ii) व 13 (iii) के आवेश 18 के अनुपात में हैं। चित्र 13 (i) में धन आवेश से निकलने वाली बल रेखायें समरूप से वितरित और त्रिज्यीय (radial) हैं। ऋण आवेश का संगत रेखा चित्र भी ठीक ऐसा ही होता केवल दिशा बताने वाले तीरोंके निशान अंदर की ओर होते।

चित्र 13 (i)–**धन आवेश**

चित्र 13 (ii) व 13 (iii) में धन आवेश से जितनी बल रेखायें निकलती हैं ऋण आवेश पर उतनी ही विलीन होती हैं। चित्र 13 (ii) की तुलना एक अकेले चुम्बक की बल रेखाओं से कीजिये, पूर्ण समानता मिलेगी।

चित्र 13 (ii)–
दो बराबर विपरीत आवेश

चित्र 13 (iii)–
दो बराबर व समान आवेश

चित्र 13 (iii) में दोनों आवेशों को मिलाने वाली रेखा के मध्य बिन्दु पर स्थित आवेश दो बराबर और विपरीत बलों का अनुभव करेगा। परिणामत: उस विन्दु पर क्षेत्र की तीव्रता शून्य हो जायेगी। इस बिन्दु को **"उदासीन बिन्दु"** (Neutral Point) कहते हैं।

2.9. **विद्युतीय-विभव (Electrical Potential)**—वह भौतिक राशि है जो उपयुक्त सुगम और स्वतंत्र मार्ग उपस्थित होने पर विद्युत आवेश के स्थानान्तरण (वहन) की दिशा निर्धारित करती है। गुरुत्व क्षेत्र (Gravitational Field) में पदार्थीय कण ऊँचे गुरुत्व विभव [ऊँचे तल (level)] के स्थानों से नीचे गुरुत्व विभव के स्थानों की ओर चलते हैं। स्वतंत्र पत्थर सदैव पृथ्वी के केन्द्र की ओर जाने का प्रयत्न करता है क्योंकि वहाँ पर गुरुत्व विभव न्यूनतम (शून्य) है। पानी सदैव ऊँचे तल से नीचे तल की ओर बहता है। चित्र 14 (i) की भाँति दो जार A और B को

एक टोंटी T और नली से जोड़ दो। B जार A की अपेक्षा चौड़ा है। दोनों में एक-एक लोटा पानी भर दीजिये। स्पष्ट है कि A में पानी का तल B से ऊँचा होगा।

(i) चित्र 14 (ii)

परन्तु दोनों में पानी की मात्रा समान है। अब T को खोल कर A और B का सम्बंध जोड़ दीजिये। पानी A से B की ओर बहता रहेगा और स्थिर अवस्था में चित्र 14(ii) की भाँति A और B दोनों में पानी का तल समान हो जायेगा।

पानी के बहने की दिशा पानी की मात्रा पर निर्भर नहीं करती, बल्कि आपेक्षिक तल पर करती है। मात्राओं का चाहे कोई अनुपात हो पानी सदैव ऊँचे तल से नीचे तल की ओर बहेगा और बहाव केवल तब तक जारी रहेगा जब तक कि तल एक नहीं हो जाता।

जैसे-जैसे हम पृथ्वी से दूर हटते जाते है, पदार्थीय कण की स्थितिज ऊर्जा (Potential Energy) बढ़ती जाती है। अतः तल (level) को हम गुरुत्व विभव (Gravitational Potential) अथवा स्थिर-द्रव विभव (Hydrostatic Potential) के नाम से भी पुकार सकते हैं और कह सकते हैं कि स्वतन्त्र अवस्था में पदार्थीय कण (ठोस हो या द्रव) सदैव ऊँचे विभव से नीचे विभव की ओर चलता है।

उष्मीय ऊर्जा (Thermal Energy) के प्रसंग में इसके संगत ताप (Temperature) है। उष्मा (Heat) सदैव ऊँचे ताप से नीचे ताप की ओर बहती है। वहन की दिशा पर उष्मा की मात्रा का कोई प्रभाव नहीं होगा। ताप को उष्मीय विभव (Thermal Potential) भी कह सकते हैं।

उष्मा के ताप और गुरुत्वाकर्षण व स्थिर-द्रव विज्ञान (Hydrostatics) के 'तल' (Level) के संगत राशि को स्थिर विद्युत विज्ञान (Electro Statics) में विद्युत विभव (Electrical Potential) अथवा केवल **विभव** (Potential) कहते हैं।

विद्युत विभव के विचार को पूर्ण रूप से आत्मसात करने में कठिनाई होती है क्योंकि इसके लिये मस्तिष्क को किसी भौतिक चित्रण की सहायता नहीं मिलती। जब ताप बढ़ता है तो पारे के बढ़ते हुए डोरे का चित्र सामने आ जाता है। तल के बढ़ने की बात ऊँचाई के चित्र से समझ में आ जाती है। परन्तु विभव के लिये कोई ऐसा सहायक चित्रण नहीं है।

2.10. **इलैक्ट्रन सिद्धांत से विभव की व्याख्या**—ऋण आवेशित चालक के धरातल पर इलैक्ट्रन वितरित होते हैं। पारस्परिक विकर्षण के फलस्वरूप प्रत्येक इलक्ट्रन तल के अभिलम्ब भागने का प्रयत्न करता है। इसके परिणाम-स्वरूप चालक के तल पर एक प्रकार का चॉप (Stress) कार्य करता है जिसे स्थिर-विद्युत्-चॉप (Electrostatic Pressure) कहते हैं। जब दो आवेशित वस्तुऐं परस्पर जोड़ी जाती हैं तो इलैक्ट्रन ऊँचे विद्युत् चॉप से नीचे विद्युत् चॉप वाली वस्तु में स्थानान्तरित होकर दोनों पर समान चॉप की अवस्था ला देते हैं। यही बात धन आवेशित वस्तुओं में भी होती है। स्पष्ट है कि आवेश का स्थानान्तरण उसकी मात्रा से नहीं वरन् स्थिर विद्युत् चॉप से निर्धारित होता है। अतः विभव के संगत इलैक्ट्रन सिद्धान्त में **स्थिर-विद्युत्-चाप** शब्द है।

2.11. **विभव की माप (Measurement) व इकाई (Unit)**—दो बिन्दुओं A, B के बीच तलों के अन्तर को हम कार्य की उस मात्रा से भी नाप सकते हैं जो एक ग्राम भार को A से B तक ले जाने में करना पड़ता है। यदि सम्पादित कार्य 980 अर्ग हो तो A और B के तलों में 1 सें० मी० का अन्तर होगा। यहाँ 980 गुरुत्व-जनित-त्वरित्र (Acceleration Due to Gravity) है। इस समय A और B के गुरुत्व विभव में 980 इकाई (अर्ग) का अन्तर होगा।

ठीक इसी प्रकार किसी विद्युतीय क्षेत्र के दो बिन्दुओं के बीच विद्युत विभवान्तर अर्गों में नापे गये उस कार्य के बराबर होगा जो एक बिन्दु से दूसरे तक एक इकाई धन आवेश के ले जाने में करना पड़ेगा।

क्षेत्र के किसी बिन्दु पर विद्युत विभव अर्गों में उस कार्य के बराबर है जो धन विद्युत एकांक (Unit Positive Charge) को अनन्त अर्थात् क्षेत्र के बाहर से बिन्दु विशेष तक लाने में व्यय होता है। यदि एक स्थिर वि० ए० (*e.s.u.*) धन आवेश को अनन्त से बिन्दु तक लाने में x अर्ग कार्य करना पड़े तो बिन्दु विशेष पर विद्युतीय क्षेत्र का विभव x *e.s.u.* होगा।

स्पष्ट है कि इस प्रकार ऋण आवेश को लाने में आवेश स्वयं कार्य करेगा और ऊर्जा मुक्त होगी। धन आवेश (प्रोटन) ऊँचे विभव से नीचे विभव की ओर तथा ऋण आवेश (इलैक्ट्रन) नीचे विभव से ऊँचे विभव की ओर चलता है।

विभव एक अदिष्ट (Scalar) राशि है। अतः किसी बिन्दु पर कई क्षेत्रों का संयुक्त विभव व्यक्तिगत विभवों के बीजगणितीय योग (Algebraical sum) के बराबर होगा। परन्तु एक बिन्दु पर विभव का मान केवल एक ही हो सकता है। अतः विभव आकाश बिन्दुओं पर एक मान रखने वाली राशि (Single Valued Space Point Function) है।

व्यावहारिक इकाई—व्यवहार के लिये यह इकाई कुछ बड़ी है। अतः विभव के लिये एक दूसरी इकाई **"वोल्ट"** (Volt) मानी गई है।

$$1 \text{ वोल्ट} = \frac{1}{300} \; e.s.u.$$

एक वोल्ट विभवान्तर वाले दो बिन्दुओं के बीच, एक कूलम्ब (व्यावहारिक इकाई) धन आवेश को क्षेत्र के विपरीत स्थानान्तरित करने में, एक जूल (व्यावहारिक इकाई) कार्य करना पड़ेगा।

$$\text{अतः} \quad 1 \text{ वोल्ट} = \frac{\text{कार्य की व्यावहारिक इकाई}}{\text{आवेश की व्यावहारिक इकाई}}$$

$$= \frac{10^7 \times \text{कार्य की स० ग० स० इकाई (अर्ग)}}{3 \times 10^9 \text{ आवेश की स० ग० स० इकाई } (e.s.u.)}$$

$$\therefore \quad 1 \text{ वोल्ट} = 1/300 \text{ स० ग० स०, स्थि० वि० ए०}$$

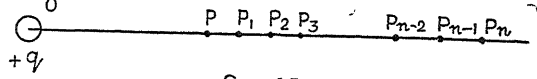
2.12. **पृथ्वी का विभव**—समुद्र के तल को शून्य मान कर पृथ्वी के ऊपर अथवा खान के अन्दर धन (ऊँचाई) और ऋण (नीचाई) तल नापा जाता है। इसी प्रकार विद्युतीय मापन में पृथ्वी का विभव शून्य माना जाता है। वस्तु को पृथ्वी से जोड़ देने पर यदि इलैक्ट्रन पृथ्वी से वस्तु की ओर बहें तो वस्तु का विभव धनात्मक होता है और ऋणात्मक विभव की वस्तु को पृथ्वी से जोड़ने पर इलैक्ट्रन वस्तु से पृथ्वी की ओर बहते हैं।

2.13. **चालक का विभव**—कूलम्ब के नियमानुसार दो आवेशों q_1, q_2 के बीच d दूरी पर बल वायु में, $F = q_1 q_2 / d^2$ होता है।

जब दोनों आवेश परस्पर स्पर्श करते हैं तो $d = 0$ और $F = \infty$ अनन्त हो जाता है। इस आधार पर दो समान आवेशों को स्पर्श कराना असम्भव है क्योंकि ऐसा करने में असाधारणतः ऊँचे बल का विरोध करना होगा।

एक धन-बिन्दु आवेश के विभव की गणना के लिये इकाई धन आवेश को अनन्त से उस बिन्दु आवेश तक लाना होगा। सैद्धान्तिक दृष्टिकोण से यह असंभव है क्योंकि बिन्दु आवेश निकट आने पर बल इतना अधिक हो जायेगा कि आगे बढ़ना असम्भव होगा। वास्तव में जब दो समान आवेशित वस्तुयें पास लाई जाती हैं तो उनके आवेश पारस्परिक प्रतिकर्षण के कारण वस्तुओं के दूरस्थ भागों में हट जाते हैं और उनमें पर्याप्त फासला हो जाता है। अतः दोनों वस्तुओं को मिला देने में अधिक कठिनाई नहीं होती। स्पर्श के बाद दोनों चालक अकेले चालक की तरह व्यवहार करते हैं और आवेश पुनर्वितरित होकर स्थिर विद्युत चाँप सम (Uniform) कर देता है।

इस सैद्धान्तिक कठिनाई को बचाने के लिये किसी चालक के, स्वकीय आवेश के कारण, विभव की परिभाषा उस बिन्दु के विभव के बराबर की गई है जो चालक के तल से अनन्त निकट परन्तु बाहर हो।

2.14. **बिन्दु आवेश के कारण विभव**—मान लीजिये O पर एक बहुत छोटी (लगभग एक बिन्दु) वस्तु पर $+q$ *e.s.u.* आवेश है। O से d सें० मी० दूर P बिन्दु का विद्युत विभव का मान निकालना है। अनन्त से P तक इकाई धन आवेश को

चित्र 15

लाने में किये गये कार्य की गणना करने के लिये OP ऋजु रेखा को बढ़ाकर एक काफी दूर बिन्दु P_n लीजिये। $P\,P_n$ दूरी को n छोटे छोटे भागों में $P_1, P_2, P_3, \cdots P_{n-2}, P_{n-1}$ आदि बिन्दु से बाट दीजिये। P से P_n तक जाने में क्षेत्र की तीव्रता लगातार उत्क्रम वर्ग नियम के अनुसार बदलती जायेगी। परन्तु इस प्रकार प्राप्त हुये विभाजित भाग इतने छोटे हैं कि गणना के लिये एक मध्यमान सम तीव्रता ले सकते हैं।

मान लीजिये O से P की दूरी d, P_1, की $d_1, \ldots P_n$ की d_n है। अतः क्षेत्र की तीव्रता P पर $F = q/d^2$, P_1 पर $F_1 = q/d_1^2, \ldots P_n$ पर $F_n = q/d_n^2$ है। भाग इतने छोटे हैं कि P और P_1 के बीच मध्यमान सम तीव्रता F_{01} मान सकते हैं। स्पष्टतया F_{01} का मान F और F_1 के बीच होगा। वास्तव में

$$F_{01} = \sqrt{F \times F_1}$$

$$= \sqrt{q/d^2 \times q/d_1^2} = q/dd_1$$

इसी प्रकार अन्य भागों के लिये सम मध्यमान तीव्रतायें

$F_{1,2} = q/d_1 d_2$, $F_{2,3} = q/d_2 d_3 \ldots F_{(n-2),\,(n-1)} = q/d_{(n-2)}\, d_{(n-1)}$

तथा $F_{(n-1),\,n} = q/d_{(n-1)}\, d_n$ हुई।

अब कार्य = बल × दूरी

$\therefore$ P_n से P_{n-1} तक इकाई धन आवेश को लाने में किया गया कार्य

$$W_{n \to (n-1)} = \frac{q}{d_{(n\ 1)}\ d_n}(d_{n-1} - d_n)$$

इसी प्रकार $W_{(n-1) \to (n-2)} = \dfrac{q}{d_{(n-2)}\, d_{(n-1)}}(d_{n-1} - d_{n-2})$

....

....

....

$$W_{3 \to 2} = q/d_2 d_3 \;\; (d_3 - d_2)$$

$$W_{2 \to 1} = q/d_1 d_2 \;\; (d_2 - d_1)$$

$$W_{1 \to 0} = q/dd_1 \;\; (d_1 - d)$$

जोड़ने से, $W_{n \to (n-1)} + W_{(n-1) \to (n-2)} + \ldots . W_{2 \to 1} + W_{1 \to 0} = q/d - q/d_n$

इस समीकरण के बांई तरफ का जोड़ विभिन्न भागों में होते हुये P_n से P तक इकाई धन आवेश को लाने में व्यय हुआ कार्य $W_{n\to 0}$ के बराबर है।

अर्थात् $W_{n\to 0}=(q/d-q/d_n)$ अर्ग

अतः P और P_n के बीच विभवान्तर $(V_P-V_{Pn})=(q/d-q/d_n)$ *e.s.u.*

यदि P_n को अनन्त पर स्थित मान लें तो $d_n\to\infty$ हो जायेगा तथा P और P_n का विभवान्तर V_P-V_{Pn} परिभाषा के अनुसार P के विभव V_P के बराबर हो जायेगा।

अतः P का विभव $V_P=q/d-q/\infty=q/d$ *e.s.u.*

$\therefore$ किसी विन्दु पर विभव=आवेश/दूरी

अनेक विन्दु आवेशों द्वारा विभव—क्योंकि विभव एक अदिष्ट (Scaler) राशि है अतः किसी विन्दु पर अनेक क्षेत्रों का संयुक्त विभव उनके व्यक्तिगत विभवों का योग होगा। मान लीजिये $q_1, q_2, q_3 \ldots . q_n$ आवेश किसी विन्दु से $d_1, d_2, d_3 \ldots . d_n$ सें० मी० की दूरी पर स्थित हैं। तो उस बिन्दु पर संयुक्त परिणामित विभव

$$V=\frac{q_1}{d_1}+\frac{q_2}{d_2}+\ldots .\frac{q_n}{d_n}$$

$$=\Sigma\frac{q_n}{d_n}$$

यदि कोई आवेश ऋण है तो उसका विभव भी ऋणात्मक होगा।

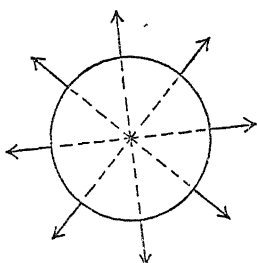
2.15. **सम-विभव तल (Equipotential Surfaces)**—जैसा कि नाम से प्रकट है एक सम-विभव तल के प्रत्येक और समस्त बिन्दुओं पर विद्युत विभव समान होता है। अर्थात् उसके किन्हीं भी दो बिन्दुओं के बीच विभवान्तर शून्य होता है। अतः इस तल पर विद्युत आवेश को चलाने में कोई कार्य नहीं करना पड़ता। इसका अर्थ यह हुआ कि क्षेत्र की कुल परिणामित-तीव्रता सम-विभव तल के समकोणिक होती है और तल के समान्तर तीव्रता का अवयव शून्य होता है। विद्युतीय बल रेखायें क्योंकि तीव्रता की परिणामित दिशा बताती हैं अतः वे सम-विभव तल से समकोण पर मिलती हैं।

एक बिन्दु आवेश q को केन्द्र मान कर वदलते हुए अर्द्ध व्यास $d_1, d_2, d_3, \ldots$ से कई समकेन्द्रीय गोले खींचिये। स्पष्ट है कि इन गोलों के धरातल पर विभव का मान क्रमशः $q/d_1, q/d_2, q/d_3, \ldots$ होगा। अतः ये सब सम-विभव तल हुए।

सुचालक का तल—सुचालक के धरातल पर दो बिन्दुओं के बीच विभवान्तर उत्पन्न कर देने से इलैक्ट्रन नीचे विभव के भाग से ऊँचे विभव के भाग में लगातार जाते रहेंगे। इलैक्ट्रन का यह वहाव तब तक जारी रहेगा जब तक कि सुचालक के समस्त बिन्दुओं का विभव एक नहीं हो जाता। अतः सुचालक स्वयं भी एक सम-विभव तल ही नहीं वरन् एक सम-विभव आयतन (Equipotential volume) हुआ।

अचालक के शरीर में विभवान्तर उत्पन्न करने से आवेश वहन नहीं होगा क्योंकि प्रकृति के अनुसार अचालक विद्युत को अपने शरीर में होकर बहने नहीं देता।

अतः सुचालक और अचालक में यह भी अन्तर है कि सुचालक अपने शरीर में विभवान्तर की उपस्थिति बर्दाश्त नहीं करता। अचालक के शरीर में विभवान्तर स्थिर रह सकता है।

2.16. **आवेशित गोलाकार चालक का विभव और तीव्रता**—सुचालक का तल सम विभव तल होता है। विद्युतीय बल रेखायें अभिलम्ब मिलती हैं। अतः एक गोलाकार चालक (त्रिज्या r सें० मी०) को $+q$ *e.s.u.* आवेश देने से आवेश उसकी सतह पर समान रूप से वितरित हो जायेगा। प्रत्येक बिन्दु पर आवेश का क्षेत्र-घनत्व $\sigma = q/4\pi r^2$ होगा। उसके धरातल पर $\frac{4\pi}{K} q$ बल रेखायें समान त्रिज्यीय रूप से निकलेंगी। अतः सतह पर क्षेत्र की तीव्रता

चित्र 16

=बल रेखाओं का क्षेत्र घनत्व

$$= \frac{\text{कुल बल रेखायें}}{\text{कुल क्षेत्रफल}}$$

अतः तीव्रता $F = \dfrac{\frac{4\pi q}{k}}{4\pi r^2}$

$$= \frac{1}{k} \cdot \frac{q}{r^2}$$

तीव्रता का यह व्यंजक व्यक्त करता है जैसे समस्त आवेश $+q$ सतह से r सें० मी० दूर अर्थात् गोले के केन्द्र पर स्थित है।

अब $$F/\sigma = 1/k \frac{q}{r^2} \Big/ \frac{q}{4\pi r^2}$$

$$= \frac{4\pi}{k}$$

$$\therefore \quad F = \frac{4\pi}{k} \sigma$$

अर्थात्—सुचालक के तल पर क्षेत्र की तीव्रता स्थानीय क्षेत्र आवेश घनत्व (σ) से $\frac{4\pi}{k}$ गुना होती है।

विभव—गोले को दिया हुआ आवेश उसके केन्द्र पर स्थित हुआ प्रतीत होता है। अतः गोले के बाहर सतह से d सें० मी० दूर बिन्दु का विभव,

$$V_d = \frac{q}{(r+d)}$$

जैसे-जैसे d घट कर शून्य होता है, विन्दु चालक के तल के निकट आता जाता है। अन्त में जब बिन्दु तल के अनन्त निकट होगा तो परिभाषा के अनुसार उसका विभव ही चालक का स्वयं विभव होगा। अतः गोले का स्वकीय आवेश के कारण विभव,

$$V = V_d$$

जब $d = 0$

अर्थात् $$V = \frac{q}{(r+0)} = q/r$$

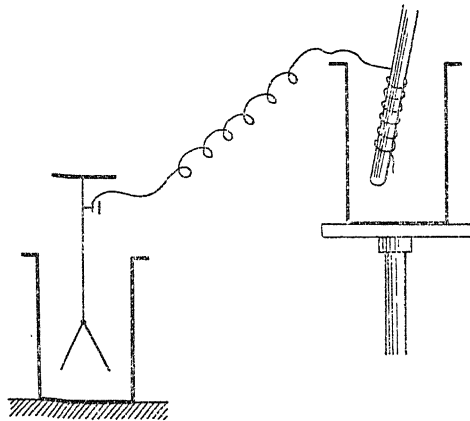
$$\text{विभव} = \frac{\text{आवेश}}{\text{त्रिज्या}}$$

2.17. **स्वर्ण-पत्र विद्युतदर्शी से विभव का मापन**—धनात्मक आवेश, चकती को दीजिये। आवेश फैल कर पत्रों तक पहुँचेगा। उनका विभव धनात्मक हो जायेगा। परन्तु टीन-पत्र पेंदी के द्वारा पृथ्वी से सम्बन्धित हैं, अतः शून्य विभव पर हैं। स्वर्ण-पत्रों का विभव टीन-पत्रों से ऊँचा है, अतः स्वर्ण-पत्रों का धन आवेश ऊँचे विभव से नीचे विभव की ओर जाने के प्रयत्न में पत्रों को चौड़ा कर देता है।

इस बीच में यदि चकती को भिन्न विभव की वस्तु से सम्बन्धित कर दें, तो स्वर्ण-पत्रों का विभव बदल जायेगा। फैलाव भी बदल जायेगा।

ऋण आवेशित होने पर स्वर्ण-पत्रों का विभव ऋणात्मक और टीन-पत्रों का शून्य होता है। अतः स्वर्ण-पत्रों का ऋण आवेश नीचे (ऋण) विभव से ऊँचे (शून्य) विभव की ओर चलता है। स्वर्ण-पत्र चौड़ा हो जाता है।

पत्रों के फैलाव से चकती से सम्बन्धित वस्तु और पृथ्वी (टीन-पत्रों से सम्बन्धित) के विभवान्तर का मापन उचित पैमाने पर हो सकता है।

2.18. **खोखले चालक के अन्दर विभव**—पृथक्कृत खोखले धातु के बर्तन को धन-आवेशित कीजिये (चित्र 17)। आबनूस की एक छड़ पर ताँबे का पतला तार लपेटिये जिसका दूसरा सिरा स्वर्ण-पत्र विद्युतदर्शी की चकती से जड़ा है।

चित्र 17

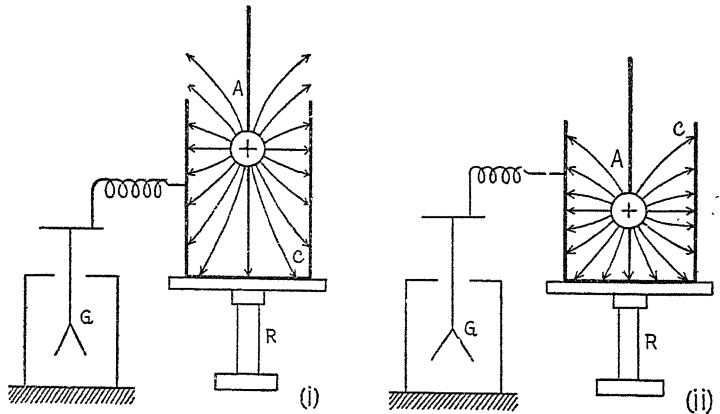
अब छड़ को धीरे-धीरे बर्तन के अन्दर ले जाइये। इस प्रकार धीरे-धीरे बढ़ते हुए विभव वाले भागों से विद्युतदर्शी को सम्बन्धित कर रहे हैं। परन्तु टीन-पत्र लगातार

पृथ्वी से जुड़े हैं। टीन और स्वर्ण-पत्रों के बीच विभवान्तर बढ़ रहा है। पत्तियाँ चौड़ी होती जा रही हैं। जब छड़ पर्याप्त अन्दर चली गई फैलाव अधिकतम होकर रुक गया। अब इस स्थिति में छड़ को इधर-उधर चलाइये फैलाव में कोई अन्तर नहीं। सर्वत्र समान विभव है। अन्त में छड़ के तार से बर्तन के अन्दर छू दीजिये। फिर भी स्वर्ण-पत्रों के फैलाव में कोई अन्तर नहीं।

स्पष्ट है कि खोखले चालक के अन्दर सर्वत्र समान विभव होता है, जो चालक के स्वकीय विभव के बराबर होता है।

सावधानी—विद्युत्दर्शी को बर्तन के आवेश के सीधे प्रभाव से बचाने के लिये दोनों को दूर रखिये।

2.19 **फैरेडे का बर्फ-बाल्टी प्रयोग (Faraday's Ice Pail Experiment)**—आवेशित वस्तु को पूरी तरह घेरनेवाली निरावेशित वस्तु पर प्रेरण से प्रेरक आवेश के ही बराबर अन्य दो विपरीत आवेश उत्पन्न होते हैं। परन्तु यदि निरावेशित वस्तु छोटी है, तो समस्त बल रेखायें उससे नहीं मिल पातीं और प्रेरित आवेश प्रेरक आवेश से कम ही रहता है। इस तथ्य का समर्थन करने के लिये फैरेडे ने निम्न प्रयोग किया—

धन आवेशित गेंद A को पृथक्कृत परन्तु विद्युत्दर्शी से सम्बन्धित धातु की बाल्टी C में धीरे-धीरे अन्दर कीजिये। (R एक अचालक स्तम्भ है।) जब तक गेंद पर्याप्त अन्दर नहीं जाती A से चलनेवाली समस्त बल रेखायें बाल्टी के तल पर नहीं मिल पातीं। कुछ वैसे ही बाहर वायु में रह जाती हैं। अतः स्वर्ण-पत्रों का फैलाव कम रहता है।

चित्र 18

[चित्र 18 (i)] जब A पूर्ण रूपेण बर्तन C के अन्दर होता है, तो पत्रों का फैलाव अधिकतम होता है चित्र 18 (ii)।

A को बर्तन के अन्दर छुआइये। फैलाव उतना ही रहता है। बाहर निकालने पर A बिल्कुल निरावेशित मिलती है।

व्याख्या—जब धन आवेशित A वाल्टी के अन्दर धीरे-धीरे लाई जाती है, तो वाल्टी की सतह पर मिलनेवाली बल रेखायें की संख्या बढ़ती जाती है। प्रेरण से C की भीतरी सतह पर ऋण और बाहरी सतह पर धन विद्युत् उत्पन्न होती है। अतः बाहर से जुड़े विद्युत् दर्शी की पत्तियाँ धन आवेश से फैल जाती हैं।

जब A पूरी अन्दर होती है, तो प्रेरण अधिकतम होता है, क्योंकि अब समस्त बल रेखाएँ वाल्टी से मिलती हैं।

अब A को अन्दर चलाने और अन्त में वाल्टी छूने से फैलाव में कोई अन्तर नहीं पड़ता, क्योंकि सर्वत्र समान विभव है। स्पर्श की इस क्रिया में A के धन और वाल्टी अन्दर की सतह के ऋण आवेश का परस्पर शून्यन हो जाता है। क्योंकि दोनों मात्रा में बराबर हैं। इसी कारण बाहर निकालने पर A निरावेशित मिलती है।

छूने से पहले अधिकतम फैलाव के बाद यदि A को बाहर निकाल लें तो पत्तियाँ सिकुड़ जाती हैं। इससे प्रकट होता है कि प्रेरित धन और ऋण आवेश परस्पर बराबर हैं और मिल कर परस्पर शून्यन कर देते हैं।

अतः प्रेरण की सर्वोत्तम स्थिति में प्रेरक आवेश के बराबर ही धन और ऋण आवेश दोनों एक साथ उत्पन्न होते हैं।

उदाहरण—1. 70 और 50 *e.s.u.* धन आवेश 10 सें० मी० मोटी शीशे की प्लेट के दोनों ओर स्थित है। यदि शीशे का पारविद्युत् नियतांक 7 हो, तो आवेशों के बीच विकर्षण बल निकालिये।

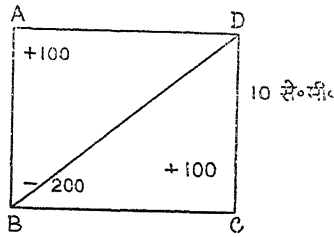
कूलम्ब के नियम से,

$$F=\frac{1}{k}\cdot\frac{q_1 q_2}{d^2}$$

यहाँ, $q_1=70,\ q_2=50,\ k=7,\ d=10$

$$\therefore\ F=\frac{70\times 50}{7\times 10^2}$$

$=5$ डाइन

उदाहरण—2. $ABCD$ एक वर्ग है जिसकी प्रत्येक भुजा 10 सें० मी० है। इसके कोने A और C पर अलग-अलग $(+100)$ इकाई धन आवेश और B पर (-200) इकाई ऋण आवेश रखे हैं। कोने D पर विद्युत् विभव ज्ञात कीजिये।

त्रिभुज BCD में C समकोण है।

$$BD^2 = BC^2 + CD^2$$

$$= 10^2 + 10^2 = 200$$

A पर स्थित आवेश का D पर विभव

$$= \frac{q}{AD}$$

$$= \frac{+100}{10} = +10$$

C पर स्थित आवेश का D पर विभव $= \frac{+100}{10} = +10$

B पर स्थित आवेश का D पर विभव $= \frac{-200}{BD}$

$$= \frac{-200}{\sqrt{200}}.$$

$$= -10\sqrt{2}$$

विभव क्योंकि अदिष्ट राशि है। अतः संयुक्त विभव

$$V = (+10) + (+10) + (-10\sqrt{2})$$

$$= (20 - 10\sqrt{2}) \ e.\ s.\ u.$$

सारांश

कूलम्ब नियम—दो बिन्दु आवेशों के बीच बल उनके गुणनफल के समानुपाती और दूरी के वर्ग के व्युत्क्रमानुपाती होता है।

चुम्बकीय बल रेखाओं के समान विद्युतीय बल रेखायें भी क्षेत्र में स्वतन्त्र धन आवेश की गति का मार्ग प्रदर्शित करती हैं।

फैरेडे ने प्रत्येक धन आवेश से सब माध्यमों में केवल एक बल-नलिका निकलती हुई मानी जिसमें $4\pi/k$ बल रेखायें होती हैं। परन्तु मैक्सवैल ने $4\pi/k$ बल नलिकाओं की कल्पना की जिनमें से प्रत्येक की अक्ष पर एक बल रेखा होती है।

क्षेत्र में किसी बिन्दु का आवेश उस बिन्दु तक अनन्त से इकाई धन आवेश लाने में व्यय हुए कार्य के बराबर होता है।

गोलाकार चालक का स्वकीय विभव $V = \frac{q}{r}$ होता है।

q गोले पर कुल आवेश है और r उसका अर्द्धव्यास।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. स्थिर विद्युत् विज्ञान में कूलम्ब के नियम की विवेचना कीजिये। इसकी सहायता से इकाई आवेश की परिभाषा बताइये।

2. चुम्बकीय बल रेखायें और विद्युतीय बल रेखाओं की परस्पर तुलना कीजिये।
   फैरेडे बल-नलिका और मैक्सवैल बल-नलिकाओं के विचार को स्पष्ट कीजिये।

3. विद्युत् विभव से आप क्या समझते हैं? एक बिन्दु आवेश द्वारा विभव के लिये व्यंजक की स्थापना कीजिये।

4. आप कैसे कह सकते हैं कि एक गोलाकार चालक को दिया गया आवेश उसके केन्द्र पर केन्द्रित होने की तरह व्यवहार करता है?
   गोलाकार चालक का विभव उसके स्वकीय आवेश के कारण निकालिये।

5. 6, 12 और 24 इकाई के धन आवेश एक वर्ग के तीन कोनों पर क्रमशः रखे हैं। चौथे कोने पर कितना आवेश रखा जाय कि केन्द्र पर विद्युत् विभव शून्य हो। [यू० पी० बोर्ड '41] **(उत्तर**—42 इकाई**)**

6. विद्युतीय क्षेत्र की परिभाषा कीजिये।
   5 सें० मी० भुजा वाले समत्रिबाहु त्रिभुज के A, B, C तीन शीर्ष हैं। A और B पर क्रमशः $+100$ और -100 इकाई के आवेश रखे हैं। C शीर्ष पर क्षत्र की तीव्रता की दिशा और परिमाण बताइये। [यू० पी० बोर्ड '49] **(उत्तर**—AB के समान्तर 4 *e.s.u.***)**

7. फैरेडे के बर्फ की बाल्टी के प्रयोगों का विवरण दीजिए और इन प्रयोगों का सैद्धान्तिक विवेचन करिए।

8. यह कैसे सिद्ध करिएगा कि किसी आविष्ट चालक का तल, समविभववाला धरातल होता है?

9. दो 5 ग्राम भार के छोटे धातु के गोले, किसी बिन्दु से 30 सें० मी० लम्बाई के नगण्य भारोंवाले डोरों में मिलम्बित होते हैं। जब गोले, समान मात्राओं की विद्युत् द्वारा आविष्ट होते हैं, तो डोरे एक दूसरे से 30° का कोण बनाते हैं। प्रत्यक गोले पर क्या आवेश होगा? **(उत्तर**—563·22 इकाई**)**

10. एक विद्युद्दर्शक एक तार की जाली के बेलन से पूर्णतः घिरा हुआ है। यदि कोई आविष्ट पिंड उसके निकट लाया जाय, तो पत्तियों का आचरण किस प्रकार का होगा?

11. यह किस प्रकार दिखाया जा सकता है कि किसी खोखले आविष्ट चालक के भीतर की समस्त रिक्ति में विभव एक ही होगा और चालक के विभव के बराबर होगा।

12. जब —10 इकाई का आवेश, 80 इकाई के आवेश से 10 सें० मी० दूरी की बजाय 20 सें० मी० दूर रखा जाये, तो कितना कार्य किया जायेगा?

अध्याय 3

धारिता और धारित्र

(Capacity and Condensers)

3.1. **चालक की धारिता (Capacity)**—जैसे-जैसे चालक पर विद्युत आवेश की मात्रा बढ़ती जाती है उसका विभव भी उसी अनुपात में बढ़ता है। मान लीजिये किसी क्षण चालक का आवेश Q और विभव V है तो,

$$Q \propto V$$

या $$Q = CV$$

समानुपाती स्थिरांक C चालक का एक भौतिक नियतांक है जिसे धारिता (Capacity) कहते हैं। इसका मान चालक के आकार, आकृति, घेरने वाले माध्यम और निकटस्थ वस्तुओं की आपेक्षिक स्थिति तथा विद्युतीय प्रकृति पर निर्भर करता है।

यदि $V=1$ कर दें तो $C=Q$ हो जाता है। अतः अंकों में चालक की धारिता आवेश की उस मात्रा के बराबर होती है जो चालक के विभव में एक इकाई के बराबर वृद्धि कर दें।

$$\therefore \quad C = Q/V$$

$$= \frac{\text{आवेश की मात्रा}}{\text{विभव में वृद्धि}}$$

3.2. **गोल चालक की धारिता**—मान लीजिये r सें० मी० त्रिज्या के गोलाकार चालक को Q इकाई आवेश देने से उसका विभव V इकाई हो जाता है। पिछले अध्याय में हम सिद्ध कर चुके हैं कि गोलाकार चालक को दिया गया आवेश समस्त बाह्य विन्दुओं के लिये इस प्रकार व्यवहार करता है जैसे सब का सब उसके केन्द्र पर ही एकत्रित हो। स्वकीय आवेश के कारण गोल चालक का विभव

$$V = Q/r \quad \text{हुआ।}$$

परन्तु यदि C उसकी धारिता है तो,

$$C = Q/V$$

और पहले सम्बन्ध से $Q/V = r$ होता है।

$$\therefore \quad C = r$$

अर्थात् गोल चालक की धारिता उसके अर्द्धव्यास के बराबर होती है।

स० ग० स० प्रणाली में 1 सें० मी० अर्द्धव्यास के गोल चालक की धारिता 1 स० ग० स० स्थिर विद्युत एकांक होगी।

धारिता की व्यवहारिक इकाई फैरेड (Farad) है।

$$\text{अब धारिता} = \frac{\text{आवेश}}{\text{विभव}}$$

$$\therefore \quad \text{फैरेड} = \frac{\text{आवेश की व्यवहारिक इकाई}}{\text{विभव की व्यवहारिक इकाई}}$$

$$= \frac{\text{कूलम्ब}}{\text{बोल्ट}}$$

$$= \frac{3 \times 10^9 \; e.s.u.}{1/300 \; e.s.u.}$$

$$\therefore \quad \text{फैरेड} = 9 \times 10^{11} \; e.s.u.$$

अब 1 फैरेड धारिता वाले गोल चालक का अर्द्धव्यास 9×10^{11} सें० मी० या 9×10^9 मीटर $= 9 \times 10^6$ किलो मीटर ।

$= 5591700$ मील होगा।

यह इकाई बहुत ही बड़ी है। अतः दो अन्य छोटी इकाइयाँ माइक्रो फैरेड (μF) और मिली फैरेड (mF) प्रयुक्त होती है।

1 माइक्रो फैरेड $= 10^{-6}$ फैरेड.

$= 9 \times 10^5 \; e.s.u.$

और 1 मिली फैरेड $= 10^{-3}$ फैरेड

$= 9 \times 10^8 \; e.s.u.$

3.3. **आवेशित चालक की स्थितिज ऊर्जा (Potential Energy of a Charged Conductor)**—अंग्रेजी भाषा के शब्द Potential और Potential Energy को देखने से ऐसा लगता है जैसे किसी चालक का विभव (Potential) उसकी स्थितिजा ऊर्जा (Potential energy) के बराबर हो—क्योंकि विभव भी कार्य (work) से नापा जाता है और स्थितिज ऊर्जा भी। परन्तु दोनों में वस्तुतः बहुत अन्तर है। निःसंदेह दोनों के लिये कार्य करना पड़ता है परन्तु दो भिन्न ढंगों से।

विभव तो उस कार्य से नापा जाता है जो इकाई धन आवेश को अनन्त से चालक के अनन्त निकट तक लाने में व्यय होता है, और स्थितिजा ऊर्जा की नाप उस कार्य से होती है जो चालक को आवेश देकर आवेशित करने में सम्पादित करना होता है। इस प्रकार किया हुआ कार्य ही चालक की स्थितिज ऊर्जा के रूप में चालक पर एकत्रित हो जाता है।

एक बाल्टी भरे पानी को किसी बर्तन में उड़ेलते समय सब का सब पानी एक दम नहीं उल्टा जा सकता। उड़ेलने में कुछ समय चाहे वह सेकिंड का एक छोटा अंश ही

क्यों न हो, अवश्य लगता है। उस समय में पानी का तल बर्तन में धीरे-धीरे बढ़कर अधिकतम मान पर पहुँच पाता है।

ठीक इसी प्रकार Q आवेश धीरे-धीरे चालक पर पहुँचता है और विभव शून्य से V तक धीरे-धीरे आवेश के अनुपात में बढ़ता है। V का मान उसकी धारिता C पर निर्भर करेगा। Q को अत्यन्त छोटे-छोटे बहुत से भागों में बँटा हुआ मानिये। समझिये कि कुल आवेश एक दम नहीं बल्कि कई किश्तों में दिया गया है। पहली किश्त O विभव पर और अन्तिम किश्त V विभव पर स्थानान्तरित की गई है। पहली के बाद वाली किश्तें धीरे-धीरे ऊँचे विभव पर दी गई हैं।

अतः यदि कुल आवेश Q चालक के मध्यमान आवेश पर स्थानान्तरित करते तो उतना ही कार्य करना पड़ता।

$$\text{अब मध्यमान विभव} = \frac{\text{प्रथम विभव} + \text{अन्तिम विभव}}{2}$$

$$= \frac{O+V}{2} = \frac{V}{2}$$

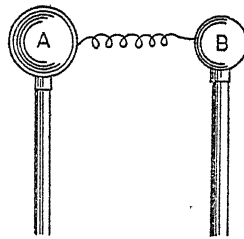
$V/2$ *e.s.u.* विभव पर इकाई आवेश (*e.s.u.*) स्थानान्तरित करने में $V/2$ अर्ग कार्य करना पड़ता। अतः Q आवेश स्थानान्तरण में कुल कार्य $= V/2 \times Q$.

$$W = \tfrac{1}{2}\, QV \text{ अर्ग}$$

यही कार्य-चालक पर स्थितिज ऊर्जा के रूप में एकत्रित होता है। अतः चालक की स्थितिज ऊर्जा, $E = \frac{1}{2}\, QV$ अर्ग

$$= \tfrac{1}{2} CV^2 \text{ अर्ग } (\because\ Q = CV)$$

$$= \tfrac{1}{2}\, Q^2/C \text{ अर्ग } (\because\ V = Q/C)$$

3.4. **आवेश का पुनर्वितरण (Redistribution of Charge)**—मान लीजिये पृथक्कृत चालक A और B को क्रमशः Q_1, और Q_2 आवेश देने से उनका विभव क्रमशः V_1 और V_2 हो जाता है। यदि उनकी धारिता क्रमशः C_1 और C_2 हो तो,

$$Q_1 = C_1 V_1, \qquad Q_2 = C_2 V_2 \text{ होगा।}$$

चित्र 19

दोनों को एक चालक तार से जोड़ने के बाद मान लीजिये दोनों का समान विभव V हो जाता है। और आवेश का पुनर्वितरण होने से A पर q_1 और B पर q_2 आवेश आ जाता है।

स्पष्ट है कि कुल आवेश $Q = Q_1 + Q_2 = C_1V_1 + C_2V_2$

और दोनों की संयुक्त धारिता $C = C_1 + C_2$ है।

अतः अन्तिम विभव $V=\frac{Q}{C}=\frac{C_1V_1+C_2V_2}{C_1+C_2}$ होगा ।

A पर अन्तिम आवेश $q_1 = C_1V$

$$=\frac{C_1(C_1V_1+C_2V_2)}{C_1+C_2}$$

और B का अन्तिम आवेश $q_2= C_2V$

$$=\frac{C_2(C_1V_1+C_2V_2)}{C_1+C_1}$$

स्पष्टतया $\frac{q_1}{q_2}=\frac{C_1V}{C_2V}=\frac{C_1}{C_2}$.

अतः पुर्नवितरित होने के बाद दोनों चालकों पर उनकी धारिता के अनुपात में आवेश आता है।

3.5. **पुनर्वितरण में ऊर्जा ह्रास (Loss of Energy)**—C धारिता के चालक को Q आवेश देने से यदि विभव V हो तो उसकी स्थितिज ऊर्जा,

$E=\frac{1}{2}\ CV^2$ होती है।

अतः A और B की विद्युत सम्वन्ध से पूर्व प्राथमिक ऊर्जाएँ क्रमशः,

$E_A=\frac{1}{2}\ C_1V_1^2,\ \ E_B=\frac{1}{2}\ C_2V_2^2$ थीं।

पुर्नवितरण के बाद उनकी ऊर्जाएँ,

$$E_A'=\frac{1}{2}\ C_1V^2,\ \ E_B'=\frac{1}{2}\ C_2V^2$$

$$=\frac{1}{2}\ C_1\left(\frac{C_1V_1+C_2V_2}{C_1+C_2}\right)^2,\ =\frac{1}{2}\ C_2\left(\frac{C_1V_1+C_1V_2}{C_1+C_2}\right)^2$$ हुआ

समुदाय (System) की प्रथम और अन्तिम कुल ऊर्जा का अन्तर

$$=(E_A+E_B)-(E_A'+E_B')$$

$$=(\tfrac{1}{2}\ C_1V_1^2+\tfrac{1}{2}\ C_2V_2^2)-(\tfrac{1}{2}\ C_1V^2+\tfrac{1}{2}\ C_2V^2)$$

$$=(\tfrac{1}{2}\ C_1V_1^2+C_2V_2^2)-\tfrac{1}{2}(C_1+C_2)\ V^2$$

$$=\frac{1}{2}\left[(C_1V_1^2+C_2V_2^2)-(C_1+C_2)\frac{(C_1V_1+C_2V_2)^2}{(C_1+C_2)^2}\right]$$

$$=\frac{1}{2}\left[(C_1V_1^2+C_2V_2^2)-\frac{(C_1V_1+C_2V_2)^2}{C_1+C_2}\right]$$

$$=\frac{1}{2(C_1+C_2)}\left[(C_1+C_2)(C_1V_1^2+C_2V_2^2)-(C_1V_1+C_2V_2)^2\right]$$

$$=\frac{1}{2(C_1+C_2)}\left[(C_1C_2V_2^2+C_1C_2V_1^2-2C_1C_2V_1V_2)\right]$$

$$=\frac{1}{2(C_1+C_2)}[C_1C_2(V_1^2+V_2^2)-2C_1C_2V_1V_2]$$

$$=\frac{C_1C_2}{2(C_1+C_2)}(V_1^2+V_2^2-2V_1V_2)$$

अतः ऊर्जा का ह्रास $=\frac{C_1C_2}{2(C_1+C_2)}(V_1-V_2)^2$

ह्रास के इस व्यंजक में C_1, C_2 दोनों धनात्मक है अतः पहला पद $\frac{C_1C_2}{2(C_1+C_2)}$ सदैव धनात्मक रहेगा। $(V_1-V_2)^2$ भी पूर्ण वर्ग है अतः कभी भी ऋणात्मक नहीं हो सकता।

जब तक V_1 और V_2 समान नहीं है $(V_1-V_2)^2$ का मान शून्य से बड़ा और धनात्मक होगा। जब $V_1=V_2$ तो $(V_1-V_2)^2$ शून्य होगा, ह्रास भी शून्य होगा।

अतः जब भी दो असमान विभव की आवेशित वस्तुएँ परस्पर जोड़ी जाती हैं तो आवेश का पुर्नवितरण होता है जिससे दोनों का विभव बराबर हो जाता है। इस पुर्नवितरण की प्रक्रिया में सदैव ऊर्जा का ह्रास होता है जो तार की उष्मा, चिनगारी या ध्वनि के रूप में प्रकट होती है। जब दोनों का विभव समान होता है तो न तो पुनर्वितरण होता है और न ऊर्जा ह्रास ही।

3.6. **धारित्र (Condenser)**—पृथक्कृत चालक की धारिता बढ़ाने का समायोजन (arrangement) धारित्र कहलाता है। चालक की धारिता उसके आकार और आकृति के साथ घेरने वाले माध्यम और समीपवर्ती वस्तुओं पर निर्भर करती है। जैसा कि हमने पहले देखा 1 फैरेड की धारिता वाले चालक का अर्द्धव्यास 5591700 मील होना चाहिये। चालक के आकार को बढ़ाकर ही धारिता बढ़ाना एक दम निराशानजक है। अतः अन्य बातों को ही समुचित रूप से नियंत्रित करके ही धारित्र बनाया जाता है।

धारित्र में प्रायः (i) एक प्रधान अथवा मुख्य पृथक्कृत चालक होता है, (ii) जिसके निकट एक पृथ्वी से सम्बन्धित गौण चालक होता है।

चालकों की आकृति के अनुसार धारित्र दो प्रकार के होते हैं—(i) गोलाकार धारित्र, (ii) समान्तर प्लेट धारित्र (Parallel Plate Condenser)।

दोनों चालकों के बीच माध्यम के अनुसार भी धारित्रों का नामकरण होता है। इस प्रकार (i) वायु धारित्र (Air Condenser) (ii) कागज़ धारित्र (Paper Condenser) आदि हैं।

एक परिवर्तन शील धारित्र (Variable Condenser) भी होता है जिसकी धारिता बदल सकती है।

परिभाषा—धारित्र की धारिता उस आवेश के बराबर होती है, जो मुख्य और गौण चालकों में इकाई विभवान्तर उत्पन्न कर देता है।

3.7. गोलाकार धारित्र की धारिता (Capacity of a Spherical Condenser)

Condenser)—मान लीजिये A और B दो समकेन्द्रीय (केन्द्र O) गोले हैं जिनके अर्द्धव्यास क्रमशः r, r_1 हैं। A पृथक्कृत है और विद्युत् स्रोत से सम्बन्धित है। B पृथ्वी से जुड़ा है। A के $+Q$ आवेश से B की भीतरी सतह पर $-Q$ आवेश प्रेरित होता है। बाहरी तल का $+Q$ आवेश पृथ्वी को चला जाता है।

A का अपने आवेश के कारण विभव $V_A = \frac{+Q}{r}$

B पर स्थित $-Q$ के कारण B के अन्दर सर्वत्र विभव B के स्वकीय विभव के बराबर होगा। अतः A पर $-Q$ के कारण अतिरिक्त विभव $V_B = \frac{-Q}{r_1}$

चित्र 20

अतः A का परिणामित विभव $= V_A + V_B$

$$= \frac{Q}{r} + \frac{-Q}{r_1}$$

$$= Q\ (1/r_1 - 1/r)$$

$$= \frac{Q\,(r_1 - r)}{r\, r_1}$$

परन्तु B पृथ्वी से सम्बन्धित होने के कारण शून्य विभव पर है। अतः A और B के बीच विभवान्तर $V = \frac{Q\,(r_1 - r)}{r\, r_1}$

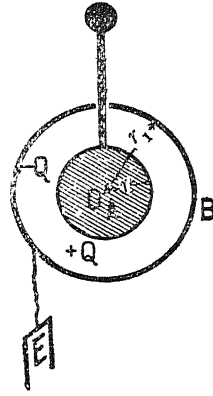
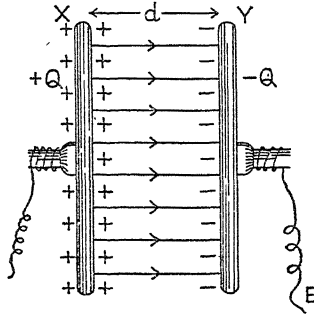
$$\therefore\ Q/V = \frac{r\, r_1}{(r_1 - r)}$$

अब धारित्र की धारिता C उस आवेश (Q) के बराबर है, जो दोनों चालकों के बीच इकाई विभवान्तर ($V=1$) उत्पन्न कर दे। अर्थात् $C = Q/V$

$\therefore$ गोलाकार धारित्र की धारिता

$$= \frac{r\, r_1}{(r_1 - r)}$$

यदि दोनों चालकों के बीच K वि० प्रे० सा० ($S.I.C.$) का माध्यम भरा है, तो धारित्र की

$$\text{धारिता} = K \frac{r\, r_1}{(r_1 - r)} \text{ होगी।}$$

3.8. **समान्तर प्लेट धारित्र की धारिता**—मान लीजिये X और Y दो समान्तर प्लेट हैं, जिनका क्षेत्रफल A वर्ग सें० मी० है। पृथक्कृत प्लेट X को विद्युत् स्रोत से जोड़ कर $+Q$ आवेश दिया गया है। $+Q$ के प्रेरण से Y पर अन्दर की ओर $-Q$ और बाहर $+Q$ आवेश उत्पन्न होता है। Y पृथ्वी से जुड़ी है अतः मुक्त $+Q$ आवेश पृथ्वी को चला जाता है। मध्यवर्ती माध्यम का वि० प्रे० सा० मान लीजिये K है। अतः X के तल से $\frac{4\pi}{K}Q$ बल रेखायें चल कर Y पर गिरेंगी। दोनों के बीच की दूरी d सें० मी० इतनी कम है कि बल रेखायें समान्तर ऋजु रेखाओं का एक समुदाय हैं। अतः दोनों प्लेटों के बीच सर्वत्र क्षेत्र की तीव्रता समान है।

चित्र 21

अब X के तल से निकलनेवाली बल रेखाओं की कुल संख्या$=\frac{4\pi}{K}Q$

और X का कुल क्षेत्रफल$=A$

$\therefore$ बल रेखाओं का क्षेत्र घनत्व$=\frac{4\pi}{K}\cdot\ \frac{Q}{A}$

यही क्षेत्र की तीव्रता होगी। अतः तीव्रता

$$I=\frac{4\pi}{K}\cdot\ \frac{Q}{A} \text{ इकाई}$$

अतः प्लेटों के बीच स्थित 1*e.s.u.* धन आवेश पर कार्य करनेवाला बल $F=\frac{4\pi}{K}\cdot\ \frac{Q}{A}$ डाइन। और Y से X तक 1 *e.s.u.* धन आवेश लाने में आवश्यक

कार्य $=$बल$\times$दूरी

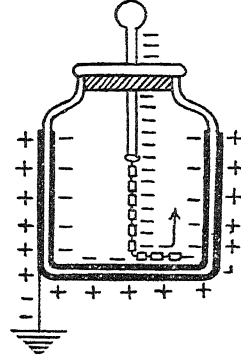
$$=\frac{4\pi}{K}\cdot\ \frac{Q}{A}\ d \text{ अर्ग}$$

$\therefore$ X और Y का विभवान्तर $V=\frac{4\pi}{K}\cdot\ \frac{Q}{A}d$ *e. s. u.*

और धारित्र की धारिता $C=\frac{Q}{V}=K\frac{A}{4\pi d}$ *e. s. u.*

अतः समानान्तर प्लेट धारित्र की धारिता प्लेटों के क्षेत्रफल की समानुपाती और दोनों के बीच की दूरी के व्युत्क्रमानुपाती होती है।

3.9. लीडन जार (Leyden Jar)—अठारहवीं शताब्दी में हॉलेंड के लीडन नामक स्थान पर एक वैज्ञानिक ने एक जार जैसे समानान्तर प्लेट धारित्र की रचना की। इसका नाम लीडन जार रखा गया।

रचना—(i) काँच के जार का बना होता है। (ii) जार की लगभग $\frac{3}{4}$ ऊँचाई तक और उसकी पेंदी में भीतर तथा बाहर टीन का पत्र चढ़ा रहता है (चित्र 22 में मोटी रेखा)। (iii) जार के मुँह में लगे अचालक डाट से एक पीतल की छड़ गुज़रती है जिसके ऊपरी सिरे पर एक घुंडी और नीचे सिरे पर पीतल की जंजीर लगी है। जंजीर जार के भीतर लगी टीन की पत्ती को स्पर्श करती है।

चित्र 22

प्रयोग—जार को मेज पर रखिये। बाहरी टीन-पत्र का सम्बन्ध पृथ्वी से हो जाता है। अब ऊपर घुंडी को विद्युत् स्रोत से जोड़ कर ऋण-आवेश दीजिये। भीतरी टीन-पत्र पर भी संचालन (Conduction) की रीति से ऋण-आवेश आ जायेगा। प्रेरण की क्रिया से बाहरी पत्र के अन्दर वाली सतह पर धन और बाहर वाली सतह पर ऋण आवेश उत्पन्न होगा। ऋण आवेश तो पृथ्वी को चला जायेगा। केवल धन आवेश ही उस पर शेष रहेगा।

लीडन जार एक धारित्र के सदृश्य कार्य करता है। जिसका मुख्य चालक भीतरी टीन-पत्र, गौण चालक बाहरी पत्र (पृथ्वी से सम्बन्धित) और जार की दीवारें पार-विद्युत् का कार्य करती है।

धारिता—समान्तर प्लेट धारित्र की धारिता $C=K\frac{A}{4\pi d}$ होती है।

यहाँ K=माध्यम (शीशा) का पारविद्युत् नियतांक

A=एक प्लेट का कुल क्षेत्रफल

d=प्लेटों के बीच की दूरी।

मान लीजिये जार की पेंदी का अर्द्धव्यास $=r$ सें० मी०

टीन-पत्र की ऊँचाई $=h$ सें० मी०

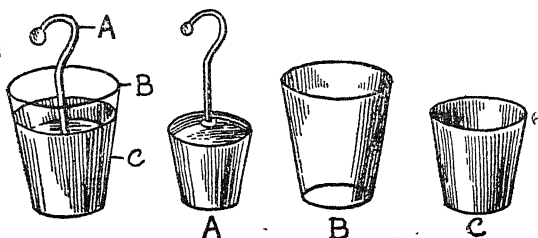
जार की दीवारों की मोटाई $=t$ सें० मी०

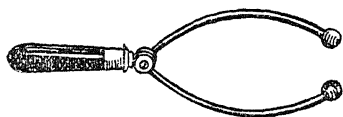
∴ एक पत्र का समस्त क्षेत्रफल $=\pi r^2+2\pi rh.$

$=\pi(r^2+2rh).$

∴ धारिता $=K.\frac{\pi(r^2+2rh)}{4\pi t}.$

$=K\left[\frac{r^2}{4t}+\frac{rh.}{2t}\right].$

3.10. **लीडन जार में आवेश का स्थान**--चित्र 23 में प्रदर्शित एक ऐसा लीडनजार लीजिये जिसके मुख्य चालक (A), गौण चालक (C) और पार-विद्युत् जार (B) अलग-अलग किये जा सकें। A एक धातु का ठोस गिलास है जिससे धातु की डंडी व घुंडी लगी हैं। यह शीशे के गिलास B में अन्दर आ सकता है। और B धातु के गिलास C में आ सकता है।

चित्र 23

तीनों को जोड़ कर लीडन जार बनाइये और आवेशित कर दीजिये। चित्र (24) में दिखाये गये विसर्जक चिमटे (Discharging Tongs) की सहायता से A और C को मिलाइये एक चिनगारी निकलेगी। थोड़ी देर बाद शान्त रहने के बाद फिर विसर्जित करने का प्रयत्न कीजिये। पुनः चिनगारी प्राप्त होगी। इसको द्वैतीयक विसर्जन (Secondary discharge) कहते हैं। प्रथम विसर्जन के बाद अवशिष्ट (Residual) आवेश के कारण ही द्वैतीयक विसर्जन होता है। कभी-कभी दो और तीन द्वैतीयक विसर्जन भी प्राप्त हो सकते हैं।

चित्र 24

यदि आवेश मुख्य (A) और गौण (B) चालकों पर स्थित होता तो प्रथम विसर्जन में ही सब का सब समाप्त हो जाता। अतः स्पष्ट है कि आवेश A और B पर न रहकर अचालक पारविद्युत् शीशे पर रहता है। इसका निस्संदेह समर्थन करने के लिये निम्न प्रयोग कीजिये।

तीनों A,B,C को मिलाकर लीडन जार को आवेशित कीजिये। रबर की चिमटी की सहायता से अब $A,B,$ और C को उठा-उठा कर अलग कर दीजिये। चालक A और C का परीक्षण करने से बिल्कुल निरावेशित मिलेंगे। अब फिर तीनों को मिला कर विसर्जन कीजिये। चिनगारी निकलेगी।

स्पष्ट है कि आवेश का वास्तविक स्थान पारविद्युत् के विपरीत तल हैं।

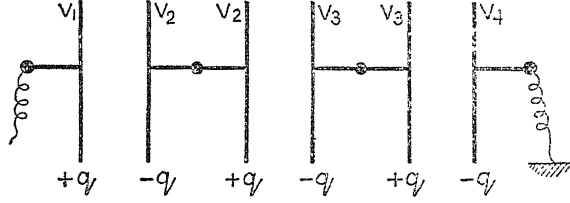
विद्युतीय आकर्षण के कारण दोनों आवेश चालकों से हट कर पृथक्कारी के अन्दर कुछ दूर तक घुस जाते हैं। प्रथम विसर्जन के समय अधिकतर आवेश तो समाप्त हो जाता है। परन्तु गहराई पर स्थित आवेश उसके बाद बाहर चालकों पर धीरे-धीरे आता है और द्वैतीयक व तृतीयक विसर्जन देता है।

3.11. **समतुल्य धारिता (Equivalent Capacity)**--अकेला धारित्र और कई धारित्रों का समुदाय परस्पर समतुल्य तब होते हैं जब कि दोनों विद्युत स्रोत

से समान आवेश की मात्रा ग्रहण करके अपनी अपनी प्रथम और अन्तिम प्लेटों के बीच समान विभवान्तर पैदा कर सकें। धारित्रों के समुदाय प्रायः दो प्रकार से बनाये जाते हैं—(i) श्रेणी क्रम में जोड़ कर, (ii) समान्तर क्रम में जोड़कर।

(i) **श्रेणीबद्ध धारित्रों की समतुल्य धारिता**—इस समंजन (arrangement) में पहले धारित्र की धन प्लेट स्रोत से, ऋण प्लेट दूसरे की धन प्लेट से; और दूसरे की ऋण प्लेट तीसरे की धन प्लेट से जोड़ते जाते हैं। अन्तिम धारित्र की ऋण प्लेट को पृथ्वी से जोड़ देते हैं।

V1 V2 V2 V3 V3 V4

+q −q +q −q +q −q

चित्र 25

मान लीजिये चित्र 25 की भाँति C_1, C_2, C_3 धारिता वाले धारित्र श्रेणीबद्ध हैं। C_1 की धन प्लेट $+q$ आवेश लेकर V_1 विभव प्राप्त करती है। प्रेरण से सब धारित्रों की धन प्लेट पर $+q$ और ऋण प्लेट पर $-q$ आवेश होगा। अन्तिम प्लेट का $+q$ आवेश पृथ्वी को चला जायेगा। विभिन्न प्लेटों के विभव चित्र में अंकित हैं। ध्यान रहे कि C_1 की ऋण और C_2 की धन प्लेट चालक द्वारा जुड़ी होने के कारण अकेले चालक की तरह कार्य करेगी और सर्वत्र समान विभव V_2 होगा, आदि

अब एक धारित्र में दोनों प्लेटों का,

$$\text{विभवान्तर} = \frac{\text{आवेश}}{\text{धारिता}}$$

अतः सब धारित्रों के लिये,

$$(V_1 - V_2) = q/C_1, \quad (V_2 - V_3) = q/c_2, \quad (V_3 - V_4) = q/c_3$$

समुदाय की प्रथम और अन्तिम प्लेटों का

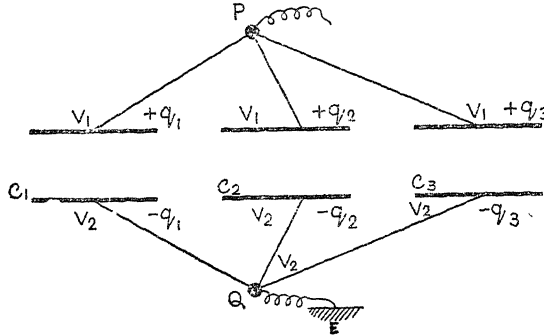
$$\begin{aligned} \text{विभवान्तर } V &= (V_1 - V_2) + (V_2 - V_3) + (V_3 - V_4) \\ &= q/c_1 + q/c_2 + q/c_3 \\ &= q(1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3) \\ \therefore \quad V/q &= 1/c_1 + 1/c_2 + 1/c_3 \end{aligned}$$

यदि समुदाय के समुल्य धारिता C है, तो वह भी समुदाय के बराबर q आवेश स्रोत से लेकर अपनी दोनों प्लेटों के बीच V विभवान्तर उत्पन्न करेगा। उस समय,

$$V/q = 1/C \text{ होगा।}$$

$$\therefore \quad 1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 \text{ हुआ।}$$

समतुल्य धारिता का विलोम श्रेणीबद्ध व्यक्तिगत धारिताओं के विलोम के योग के बराबर होता है।

(ii) **समान्तर बद्ध धारित्रों की समतुल्य धारिता**—समान्तर समंजन (arrangement) में समस्त धारित्रों की धन प्लेट एक बिन्दु P और समस्त ऋण प्लेट दूसरे बिन्दु Q पर जोड़ दी जाती हैं। P को स्रोत से और Q को पृथ्वी से सम्बन्धित कर देते हैं। विभिन्न धारित्र अपनी-अपनी धारिताओं C_1, C_2, C_3 के अनुपात में स्रोत से q_1, q_2, q_3, आवेश प्राप्त करते हैं। परन्तु सब की धन प्लेटों का विभव P के विभव V_1 के बराबर

चित्र 26

और ऋण प्लेटों का विभव Q के विभव V_2 के बराबर होता है। अतः सब के लिये विभवान्तर $(V_1 - V_2)$ ही रहता है। इसीलिये,

$$q_1 = C_1(V_1 - V_2),\ q_2 = C_2(V_1 - V_2),\ q_3 = C_3(V_1 - V_2)$$

समुदाय द्वारा स्रोत से खींचा हुआ कुल आवेश

$$Q = q_1 + q_2 + q_3.$$
$$= C_1(V_1 - V_2) + C_2(V_1 - V_2) + C_3(V_1 - V_2)$$
$$= (V_1 - V_2)\ (C_1 + C_2 + C_3)$$

$$\therefore \quad \frac{Q}{(V_1 - V_2)} = C_1 + C_2 + C_3.$$

समतुल्य धारिता C स्रोत से कुल आवेश Q लेकर $(V_1 - V_2)$ विभवान्तर प्रकट करेगी। और

$$C = \frac{Q}{(V_1 - V_2)} \text{ होगा।}$$

$$\therefore \quad C = C_1 + C_2 + C_3$$

अर्थात् समान्तर क्रम में बद्ध धारिताओं का योग उनकी समतुल्य धारिता के बराबर होता है।

3.12. **पारविद्युत् नियतांक (K) का मापन**—यह तो आप जानते ही हैं कि यदि वायु धारित्र की धारिता C है तो वायु के स्थान पर K नियतांक वाला पृथक्कारीवाले धारित्र की धारिता K गुनी होती है। अतः

$$\text{पार विद्युत् नियतांक } K = \frac{\text{धारित्र की धारिता जब प्लेटों के बीच प्रायोगिक पृथक्कारी है}}{\text{उसी धारित्र की धारिता जब प्लेटों के बीच वायु है}}$$

इसी सिद्धान्त पर सर्वप्रथम फैरेडे ने विभिन्न माध्यमों के लिये विशिष्ट प्रेरण सामर्थ्य (K) निकाला। फैरेडे का उपकरण चित्र 27 में दिखाया है।

रचना—(i) पीतल के गोले A पर एक घुंडी K लगी है। (ii) बाहर का धातु गोला B दो गोलार्धों में विभाजित हो सकता है। यह पृथ्वी से जुड़ा रहता है।

(iii) दोनों गोलों को अलग करने के लिये लाख की मोटी डाट S लगी है।

(iv) गैसों पर प्रयोग करते समय T टोंटी द्वारा अन्दर की वायु निकाल कर गैस भर देते हैं।

चित्र 27

प्रयोग—K को एक सुग्राही विद्युत्दर्शी से जोड़िये। विद्युत्दर्शी के विक्षेप से प्राथमिक विभवान्तर पढ़िये। K को Q आवेश दीजिये और परिणामित विभवान्तर V_1 पढ़ लीजिये। एक दूसरा समान फैरेडे धारित्र जिसमें प्रायोगिक पृथक्कारी लगा है इसी समय वायु धारित्र से जोड़िये। विभवान्तर V_1 से गिरकर V_2 हो जायेगा। यदि वायु धारित्र की धारिता C_1 और प्रायोगिक पृथक्कारीवाले धारित्र की धारिता C_2 हो, तो अन्तिम बार कुल धारिता$=C_1+C_2$ हुई।

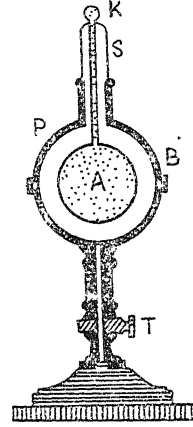
अतः $V_1=Q/C_1$

और $V_2=Q/(C_1+C_2)$

भाग देने से $$\frac{V_1}{V_2}=\frac{C_1+C_2}{C_1}=1+\frac{C_2}{C_1}$$

$$\therefore \quad \frac{C_2}{C_1}=\frac{V_1}{V_2}-1=\frac{V_1-V_2}{V_2}$$

अतः पृथक्कारी का $K=\dfrac{C_2}{C_1}=\dfrac{V_1-V_2}{V_2}$ होगा।

कुछ पृथक्कारियों के पारविद्युत् नियतांक K

पदार्थ	K	पदार्थ	K
शून्य	1·00000	शीशा क्राउन	5 से 7
वायु	1·00059	,, फ्लिंट	7 से 10
हाइड्रोजन	1·00026	आबनूस	2·30
नाइट्रोजन	1·00061	गंधक	4 से 4·2
पैराफिन तेल	4·70	अभ्रक	7
पैराफिन कागज़	2	रबर	2·2
पानी	81·0	लकड़ी	2 से 8

उदाहरण—1. दो गोलीय चालकों के अर्द्धव्यास क्रमशः 2 सें० मी० और 3 सें० मी० है। इन पर क्रमशः 5 और 10 इकाई आवेश है। दोनों को धातु के तार से जोड़ने पर दोनों का विभव क्या होगा ?

गोल चालक की धारिता = अर्द्धव्यास

∴ प्रथम और द्वितीय चालकों की धारिता क्रमशः = 2 और 3 *e.s.u.*

जोड़ने पर कुल धारिता = 2+3 = 5 इकाई

कुल आवेश = 5+10 = 15 इकाई

∴ अन्तिम विभव $= \dfrac{\text{कुल आवेश}}{\text{कुल धारिता}} = \dfrac{15}{5} = 3$ इकाई

उदाहरण—2. एक लीडन जार की एक टीन-पत्र का कुल क्षेत्रफल 600 वर्ग सें० मी० है। शीशे के बर्तन की मोटाई 1 मि० मी० है। जार की धारिता बताइये यदि शीशे का $K=5$ हो।

लीडन जार एक समान्तर प्लेट धारित्र होता है। अतः उसकी धारिता

$$= K\frac{A}{4\pi d} \text{ होगी।}$$

यहाँ $K=5$, $A=600$

$d=0{\cdot}1$ सें० मी०

$$\therefore \quad \text{धारिता} = 5\times\frac{600}{4\pi\times{\cdot}1}$$

$$= 75{,}00\times{\cdot}3183 \qquad (1/\pi = {\cdot}3183)$$

$$= 2387{\cdot}25 \; e.s.u.$$

सारांश

किसी चालक की धारिता उस आवेश के बराबर होती है, जो उसके विभव में इकाई वृद्धि कर देता है।

धारिता की व्यवहारिक इकाई फैरेड है। और

1 फैरेड = 9×10^{11} *e. s. u.* (धारिता)

गोलाकार धारित्र की धारिता $= K\dfrac{ab}{a-b}$

यहाँ a, b उसके मुख्य और गौण चालक गोलों के अर्द्धव्यास हैं और k दोनों के बीच वाले पृथक्कारी का पारविद्युत् नियतांक है।

समान्तर प्लेट धारित्र की धारिता $= K\dfrac{A}{4\pi d}$

A = प्लेट का क्षेत्रफल

d = दो प्लेटों की दूरी

धारित्र में आवेश पृथक्कारी की विपरीत सतहों पर निवास करता है।

श्रेणीवद्ध धारिताओं के समतुल्य धारिता C

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$$ सूत्र से ज्ञात होती है।

समान्तर क्रम में जुड़ी धारिताओं के समतुल्य धारिता

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

अभ्यास के लिये प्रश्न

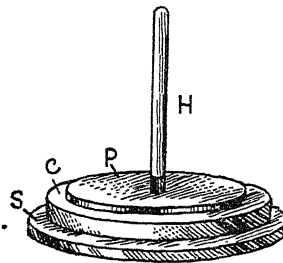
1. परिभाषा कीजिये—(i) धारिता, (ii) फैरेड
   "गोल चालक की धारिता उसके अर्द्धव्यास के बराबर होती है।" सिद्ध कीजिये।
2. आवेशित चालक की स्थितिज ऊर्जा से आप क्या समझते हैं? उसके लिये उपयुक्त सूत्र की स्थापना कीजिये।
3. "जब भी कभी दो विभिन्न विभवों के आवेशित चालक परस्पर जोड़े जाते हैं, तो ऊर्जा का ह्रास होता है।" इस कथन का गणित से समर्थन कीजिये।
4. धारित्र से आप क्या समझते हैं?
   समान्तर प्लेट धारित्र की धारिता उसकी प्लेट के क्षेत्रफल और दोनों प्लेटों की दूरी में व्यक्त करनेवाले सूत्र को निकालिये।
5. "धारित्र की धारिता" समझाइये। गोलाकार धारित्र की धारिता के लिये व्यंजक निकालिये।
6. "समतुल्य धारिता" स्पष्ट कीजिये। तीन धारितायें C_1, C_2, C_3 श्रेणीक्रम में बद्ध हैं। उनकी समतुल्य धारिता वताइये।
7. "समान्तर बद्ध धारिताओं का योग उनके समतुल्य धारिता के बराबर होता है।" सिद्ध कीजिये।
8. पारविद्युत् नियतांक को समझाइये। इस नियतांक के निकालने की एक विधि का वर्णन कीजिये।
9. एक लीडन जार की पेंदी का अर्द्धव्यास 7·5 सें० मी० और टिन-पत्रों की ऊँचाई 18 सें० मी० है। बीचवाले काँच की मोटाई 0·25 सें० मी० है। यदि काँच का $K = 6{\cdot}4$ हो, तो जार की धारिता व्यवहारिक इकाई में बताइये।
   (उत्तर—232×10^{-5} माइक्रो फैरेड**)**
10. 75 धारितावाले A चालक को आवेशित करने पर उसका विभव 20 हो जाता है। 25 धारितावाले B चालक से जोड़ने के बाद A और B का विभव और आवेश पृथक्-पृथक् बताइये।
    (विभव $= 15$ *e. s. u.*, आवेश $A = 1125$, $B = 375$ *e. s. u.*)
11. समतुल्य धारिता बताइये जब कि 100 और 200 धारिता वाले धारित्र (i) श्रेणीक्रम में जुड़े हैं, (ii) समान्तर बद्ध हैं।
    (उत्तर—श्रेणीक्रम $= 66{\cdot}66$ समान्तर $= 300$**)**
12. दो साबुन के बुलबुलों को जोड़ कर एक बड़ा बुलबुला बनाया जाता है। यदि दोनों बुलबुलों को एक दूसरे से काफ़ी दूर पर रखने से प्रत्येक का विभव P हो, तो संयुक्त बुलबुले का विभव क्या होगा? **(उत्तर**—$2^{2/3}P$**)**

13. 2 सें० मी० और 6 सें० मी० त्रिज्याओं के दो गोलों को क्रमश: 80 और 30 इकाई आवेश दिया जाता है। यदि उन्हें किसी पतले तार से जोड़ा जाय, तो तार में से कितनी बिजली गुजरेगी? **(उत्तर**—52·5 इकाई)
14. लीडन जार की कार्य प्रणाली समझाइये।
    किसी लीडन जार को आविष्ट करते समय, बाहरी आच्छादन (Coating) को क्रमश: (i) पृथग्न्यस्त (insulated) और (ii) पृथ्वी से सम्बद्ध किया जाता है। प्रत्येक स्थिति में क्या होता है?
15. दो धारित्रों को श्रेणीक्रम में जोड़ने से संयुक्त धारिता 12 वि० स्थै० इ० और समान्तर क्रम में जोड़ने से 50 वि० स्थै० इ०30 निकलती है। उनकी धारिताएँ क्या हैं? **(उत्तर**—30 और 20 वि० स्थै० इ०)
16. आपको क्रमश: 1, 2 और 3 माइक्रो-फैरेड धारिता के धारित्र दिए जाते हैं। दूसरे और तीसरे को श्रेणीक्रम में और पहले को उनके समान्तर जोड़ा जाता है। संयुक्त धारिता क्या होगी? **(उत्तर**—11/5इकाई)
17. इस कथन को समझाइये "धारित्र एक ऐसी व्यवस्था है, जिसके द्वारा किसी पृथग्न्यस्त चालक की धारिता, कृत्रिम रूप से बढ़ाई जाती है।"
18. किसी धारित्र के अवशिष्ट (residual) आवेश से क्या आभिप्राय है?

अध्याय 4

स्थिर-विद्युत् मशीन

(Electrostatic Machine)

4.1. स्थिर विद्युत आवेश दो रीतियों से उत्पन्न हो सकता है—(i) घर्षण (friction) द्वारा (ii) प्रेरण (induction) द्वारा। अत: स्थिर विद्युत मशीन वह उपकरण है जो घर्षण तथा/अथवा प्रेरण की प्रक्रिया से स्थिर विद्युत आवेश की लगातार उत्पत्ति कर सके।

चित्र 28

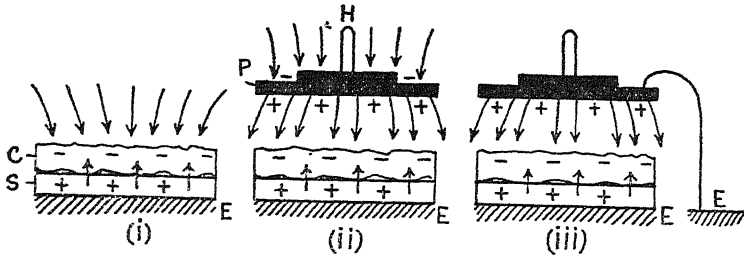
4.2. **विद्युद्धर (Electrophorus)**—इस सरल मशीन को एक बार आवेशित करके बार-बार प्रेरण की क्रिया से आवेश प्राप्त हो सकता है।

रचना—इटली के वैज्ञानिक वोल्टा ने सर्वप्रथम इसकी रचना की। इसमें मुख्यत: तीन भाग होते हैं:—

(i) पीतल की वृताकार प्लेट S जिसे पेंदी या सोल (Sole) कहते हैं।

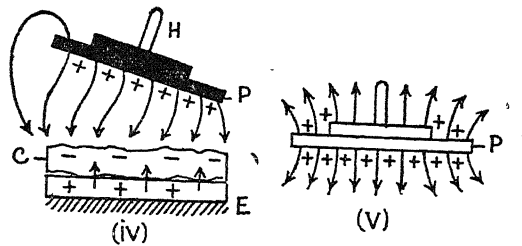
(ii) आबनूस की वृताकार प्लेट C को अचालक मंडलक (disc) या केक (Cake) कहते हैं।

(iii) अचालक हत्थे H वाली धातु का चालक मंडलक P है।

कार्यविधि—(i) पृथ्वी पर रखे हुए सोल (Sole) पर अचालक मंडलक रखकर बिल्ली की खाल के घर्षण से ऋण-आवेशित कीजिये। प्रेरण से पेंदी की ऊपरी सतह पर धन आवेश उत्पन्न होगा जो अचालक मंडलक के ऋण आवेश को बाँधे रहेगा। निचले तल का प्रेरित ऋण आवेश मुक्त होने के कारण पृथ्वी को चला जायेगा। बल रेखाओं सहित यह दशा चित्र 29 (i) में दिखाई गई है।

चित्र 29

(ii) अचालक हत्थे से पकड़कर चालक मंडलक केक के ऊपर लगभग छुआ दीजिये। केक में कुछ अचालक विन्दु उभरे रहते हैं अतः स्पर्श केवल कुछ ही विन्दुओं पर हो पाता है। अतः संचालन (conduction) की क्रिया उपेक्षणीय है।

प्रेरण से P के निचले भाग में धन और ऊपरी तल पर ऋण आवेश उत्पन्न होगा। बल रेखायें चित्र 29 (ii) की भाँति होगी।

(iii) P को केक पर रखे हुए ही छूकर पृथ्वी से जोड़ दीजिये। ऊपर का मुक्त ऋणावेश और संगत बल रेखायें समाप्त हो जायेगी। [चित्र 29 (iii)]

(iv) पृथ्वी का संबंध तोड़ दीजिये। आवेश (धन) केवल नीचे होगा। [चित्र 29 (iv)]

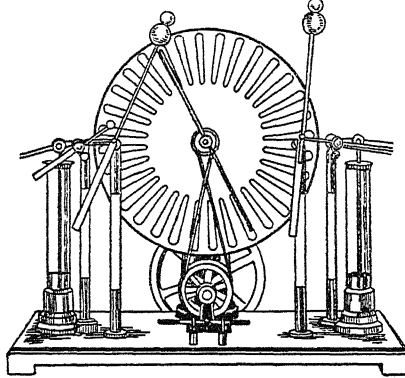
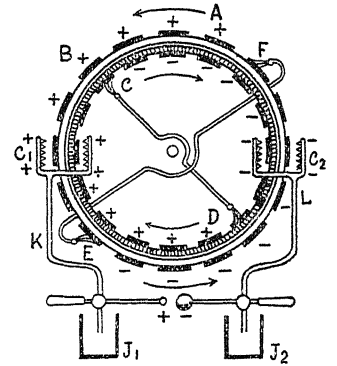
चित्र 29

(v) अचालक हत्थे से पकड़ कर P को उठा लीजिये धन आवेश ऊपर नीचे सर्वत्र फैल जायेगा। परिणामित बल रेखायें चित्र 29 (v) की भाँति होगी।

इस आवेश को प्रयोग में लाया जा सकता है और P को निरावेशित करने के बाद केक पर रखकर पूर्ववत् क्रियाओं को दुहराकर बार-बार धन आवेशित किया जा सकता है।

ऊर्जा का अनर्गल स्रोत—एक विरोधाभास :—कार्य विधि को पढ़ने से ऐसा ज्ञात होता है कि मशीन को ऊर्जा की एक सीमित (limited) मात्रा देकर उससे अपरिमित (unlimited) ऊर्जा प्राप्त कर सकते हैं। यह तथ्य ऊर्जा अविनाशता सिद्धान्त (Law of Conservation of Energy) के विरुद्ध प्रतीत होता है।

इस विरोधाभास की व्याख्या इस प्रकार है कि चालक मंडलक P को आवेशित होने के बाद जब केक से दूर विद्युत आकर्षण के विरुद्ध उठाते हैं तो कुछ कार्य करना पड़ता है। यही कार्य समुदाय (System) में स्थितिज ऊर्जा के रूप में एकत्रित हो जाता है। अतः ऊर्जा लेते समय ही हम स्वयं उतनी ही ऊर्जा प्रदान करते रहते हैं। सैद्धान्तिक आधार पर तो हम अपरिमित आवेश ले सकते हैं क्योंकि जब भी आवेश लेंगे उसकी ऊर्जा के बराबर हम दे भी देंगे। परन्तु व्यवहार में केक का आवेश संचालन द्वारा धीरे-धीरे कम होता रहता है और मंडलक को बार-बार रगड़ना पड़ता है।

4.3. **विमशर्स्ट मशीन (Wimshurst Machine)**—यह मशीन भी प्रेरण के सिद्धान्त पर कार्य करती है। वास्तविक मशीन चित्र 30 में और उसका रेखीय चित्रण चित्र 31 में प्रदर्शित है। इसके मुख्य भाग निम्न है—

चित्र 30 चित्र 31

(i) आबनूस या शीशे की बराबर त्रिज्या वाली दो वृत्ताकार समाक्षीय (co-axial) मंडलक होते हैं जो एक पहिये की सहायता से परस्पर विपरीत दिशाओं में घूम सकती है।

(ii) दोनों मंडलकों की परिधि पर बराबर संख्या में त्रिज्यीय रूप में धातु की पत्तियाँ (studs) लगी हैं। (चित्र 31 में मोटी रेखायें)।

(iii) प्रत्येक मंडलक पर व्यास की दिशा में एक-एक धातु की छड़ लगी है जिसके दोनों सिरों पर एक-एक तारों का ब्रुश है। एक छड़ में लगे दो ब्रुश एक मंडलक की परिधि के आमने सामने की धातु पत्तियों को स्पर्श करते हैं। (चित्र 31 में CD और EF)।

(iv) दो कंघियों के जोड़ें हैं (चित्र 31 में C_1, C_2)। प्रत्येक जोड़ा एक-एक अलग मुख्य चालक से सम्बन्धित है।

(v) एकत्रित आवेश को पर्याप्त मात्रा में संचित करने के लिये दो लीडन जार है, (J_1, J_2)। प्रत्येक जार की अन्दर वाली टिन की तह एक-एक मुख्य चालक और एक-एक कंघी से जुड़ी रहती है।

कार्यविधि—इस मशीन की कार्य विधि समझने के लिये चित्र 31 पर ध्यान दीजिये। चित्र में सामने का मंडलक अन्दर वाले वृत्त से और पीछे वाला मंडलक बाहरी वृत्त से दिखाई गई है। मान लीजिये पहिये की सहायता से सामने का मंडलक दक्षिणावर्त और पीछे का मंडलक वामावृत दिशा में घूम रही है।

मशीन की क्रिया को प्रारम्भ करने के लिये कुछ बाह्य आवेश की आवश्यकता होती है। मशीन को पहले प्रयोग करने के कारण अथवा वायुमंडलीय विद्युत के कारण कल्पना कीजिये कि पीछे के मंडलक की पत्ती A धन आवेश प्राप्त कर लेती है। प्रेरण से आगे के मंडलक की समीपवर्ती पत्ती की पिछली ओर ऋण और सामने के तल पर धन विद्युत् उत्पन्न होगी। जब A पत्ती B की स्थिति में आ जाती है तो C पत्ती पर प्रेरित मुक्त धनावेश ब्रुश के जोड़े के दूसरे सिरे पर भाग कर पत्ती D पर चला जाता है। अतः सामने के मंडलक पर C स्थिति से दाईं ओर दक्षिणावर्त दिशा में जाने वाली सब पत्तियाँ ऋणावेशित और D से बाईं ओर दक्षिणावर्त दिशा में जाने वाली सब पत्तियाँ धनावेशित होंगी।

सामने के मंडलक की धनावेशित पत्तियाँ जब ब्रुश E के सामने आती हैं तो उपपादन से E पर ऋणावेश और F पर धनावेश प्रकट होता है। C से दाईं ओर जाने वाली ऋणावेशित पत्तियाँ भी F के सामने वही प्रभाव उत्पन्न करती हैं अर्थात् F पर धन और E पर ऋणावेश।

इस प्रकार जैसे-जैसे दोनों मंडलक विपरीत दिशा में घूमते रहते हैं आवेश इकट्ठा करनेवाली कंघी के जोड़े C_1 की ओर दोनों मंडलकों से धनावेश और कंघी C_2 की ओर दोनों मंडलकों का ऋणावेश आता रहता है। कंघियों के दाँतें पत्तियों के बहुत निकट होते हैं, अतः दाँतों के कारण प्रबल प्रेरण होता है जिससे C_1 से जुड़े मुख्य चालक पर धनावेश और C_1 के दाँतों में ऋणावेश उत्पन्न होता है। दाँतों और पत्तियों को स्पर्श करके एक दूसरे की ओर आने-जाने वाले वायु के कण दाँतों के ऋणावेश को नष्ट कर देते हैं। साथ ही पत्तियों का धनावेश भी नष्ट हो जाता है। परन्तु मुख्य चालक पर धनावेश बना रहता है, जो सम्बन्धित लीडन जार में संचित होता रहता है। इसी प्रकार C_2 से सम्बन्धित मुख्य चालक और लीडन जार में ऋणावेश संचित होता है।

C_1 और C_2 से आगे बढ़नेवाली पिछले मंडलक की निरावेशित पत्तियाँ क्रमशः E और F स्थितियों में पहुँच कर पुनः आवेशित हो जाती हैं। इसी प्रकार

आगे के मंडलक की निरावेशित पत्तियाँ क्रमशः C और D स्थितियों में आवेशित होती हैं।

दोनों मुख्य चालकों में लगी घुंडियों को आगे पीछे किया जा सकता है। जब पर्याप्त आवेश लीडन जारों में संचित हो जाता है, तो इन घुंडियों के बीच चट-चट ध्वनि करता हुआ विसर्जन प्राप्त होता है। कभी-कभी तो तीन-चार इंच लम्बाई में विद्युत् विसर्जन प्राप्त हो सकता है। ध्यान रखिये कि वायु में 1 सें० मी० लम्वा विसर्जन उत्पन्न करने के लिये 20000 वोल्ट विभवान्तर की आवश्यकता है।

4.4. **वान-डी-ग्राफ-उत्पादक (Van de Graaff Generator)**—परमाणु और नाभिक के विच्छेदन से सम्बन्धित प्रयोगों में काम आनेवाला विभवान्तर विमशर्ट मशीन द्वारा उत्पन्न किये गये विभवान्तर से कहीं अधिक होता है। किन्तु इस मशीन की सहायता से 50 लाख वोल्ट तक का विभवान्तर उत्पन्न किया जा चुका है।

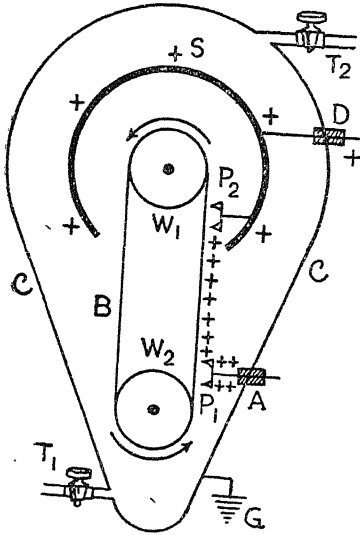
चित्र 32

रचना—इसमें निम्न मुख्य भाग होते हैं–

(i) एक बड़ा खोखला धातु का गोला S है जिसका मुँह नीचे की ओर खुला है।

(ii) S के केन्द्र पर एक अचालक घिर्री W_1 है।

(iii) घिर्री W_1 से ठीक नीचे दूसरी घिर्री W_2 है। और दोनों घिर्रियों W_1 व W_2 पर एक रेशम या चमड़े की अचालक माला चढ़ी है।

(iv) W_2 घिर्री को लगातार घुमाने के लिये एक विद्युत् इंजिन (Electric Motor) प्रयुक्त होती है।

(v) गोला S और घिर्रियाँ सब एक बड़े धातु के बर्तन CC में बन्द रहते हैं, जो पृथ्वी से (G) से जुड़ा रहता है।

(vi) A और D पर लगे आबनूस के डाटों में हो कर एक-एक धातु की छड़ निकलती है। D से जानेवाली छड़ S को स्पर्श करती है।

(vii) A से जानेवाली छड़ के सिरे पर धातु के दाँते P_1 होते हैं, जो पेटी के बहुत निकट होते हैं। इसी प्रकार के दाँते P_2 गोला S से निकली हुई छड़ के सिरे पर और पेटी के बहुत निकट होते हैं।

(viii) बड़े वर्तन CC में लगी टोटियों T_1, T_2 की सहायता से अन्दर की वायु का दबाव नियंत्रित किया जा सकता है।

कार्य-विधि—विमशर्ट या अन्य किसी मशीन के प्रधान चालक से जोड़ कर A से निकलनेवाली छड़ और दाँतों P_1 को लगातार 10,000 या 20,000 वोल्ट पर स्थिर रखते हैं। विद्युत् मोटर की सहायता से घिर्री W_2 को तेज़ी से घुमाते हैं जिससे पेटी लगभग 500–5000 फुट प्रति सेकिंड की गति से चलती है।

(ii) P_1 दाँतों के निकट वाले पेटी के भाग में वायु के कणों द्वारा धनावेश पहुँच जाता है और पेटी के अचालक होने के कारण उसी स्थान पर बना रहता है तथा पेटी की गति के साथ P_2 दाँतों के सम्मुख आ जाता है।

(iii) इस धनावेश के प्रेरण से दाँतों के निकटस्थ भाग में ऋण और दूरस्थ भाग में धनावेश उत्पन्न होता है। नुकीले दाँतों से वायु कणों के साथ चूकर ऋणावेश पेटी के धनावेश को नष्ट कर देता है और साथ में स्वयं भी नष्ट हो जाता है। दाँतों का धनावेश धातु गोले S के बाहरी तल पर चला जाता है।

(iv) मशीन के लगातार चलते रहने से S पर धनावेश की मात्रा बढ़ती जाती है जिससे उसका विभव चढ़ता रहता है।

(v) सामान्य वायु दबाव पर नीचे ही विभवान्तर पर विद्युत् विसर्जन होने लगता है। अतः T_1 और T_2 की सहायता से अन्दर वायु दबाव 50 से 100 पौंड प्रति वर्ग इंच तक बढ़ा देते हैं जिससे 50 लाख वोल्ट तक का विभवान्तर इस मशीन द्वारा मिल सकता है। इससे प्राप्त हुए विद्युत् विसर्जन का प्रकाश और कड़कड़ाहट तड़ित् की कौंध से कम नहीं होता।

4.5. **वायुमंडलीय विद्युत् (Atmospheric Electricity)**—सर्वप्रथम अठारहवीं शताब्दी में अमेरिका के वैज्ञानिक बैन्जामिन फ्रेंकलिन (Benjamin Franklin) ने अपने पतंग के मनोरंजक प्रयोग द्वारा सिद्ध किया कि वायुमंडल में विद्युत् उपस्थित रहती है। जब उन्होंने रेशम की डोरी से रेशम की पतंग उड़ाई तो उन्हें डोरी के नीचे बँधे चाबी के गुच्छे के पास हाथ ले जाने पर एक जोर का धक्का लगा। उस समय बारिश हो रही थी। डोरी भींग कर चालक बन गई थी और बादलों में स्थित पतंग द्वारा एकत्रित विद्युत् चाबियों के गुच्छे में आ गई थी।

अभी कुछ ही वर्ष हुए सिम्पसन (Simpson) और स्क्रीज (Screase) ने बादलों की विद्युतीय दशा के अध्ययन के लिये एक बहुत ही सुन्दर उपकरण बनाया है। एक छोटे से गुब्बारे के नीचे लगभग 70 फुट लम्बा बहुत ही पतला तार लटकाया गया। बादलों में जहाँ भी विद्युतीय क्षेत्र होगा तार में एक धारा बहने लगेगी और एक विशेष उपकरण द्वारा अभिलेखित हो जायेगी।

उनकी खोज से पता चला है कि तड़ित उत्पन्न करनेवाले बादल का शीर्ष सदैव धनावेशित होता है और पेंदी ऋणात्मक। कभी-कभी छोटे-छोटे क्षेत्रों में धनावेश की थेगलियाँ सी भी मिलती हैं।

विल्सन ने खोज की कि तड़ित् के समय साधारणतया (परन्तु सदैव नहीं) पृथ्वी धनात्मक और बादल ऋणात्मक होता है।

तड़ित (Thunder)—तड़ित् की प्रक्रिया और कार्य-विधि को समझने के लिये C. V. Boys ने एक केमरा बनाया जिसमें दो "दृश्य तालों" (Objectives) की सहायता से उनके पीछे लगातार घूमनेवाली फोटोग्राफ फिल्म पर फोटो लिये जाते हैं। इन खोजों से स्पष्ट हुआ है कि तड़ित् के समय सर्वप्रथम बादलों से पृथ्वी की ओर एक "अगुआ" (Leader) विसर्जन आता है। उसका मार्ग लगभग 50 गज़ के कदमों (Steps) का होता है। प्रत्येक कदम पर गति की दिशा बदलती जाती है। इससे वायु बहुत तप्त होकर चालक बन जाती है। इसके बाद अत्यधिक कौंध वाला विसर्जन पृथ्वी से बादलों की ओर जाता है। कभी-कभी दो-तीन या अधिक तड़ित् आघात भी होते हैं परन्तु प्रत्येक आघात में ये दोनों ओर (बादल से पृथ्वी और फिर उल्टा) जानेवाली प्रक्रिया होती है।

तड़ित् आघात द्वारा बड़ा ऊँचा सामर्थ्य (Power) उत्पन्न होता है। दस लाख किलोवाट का सामर्थ्य तो साधारणतया प्राप्त हो सकता है।

वायुमंडलीय विद्युत् के कारण—सूर्य से आनेवाली नील-लोहितोत्तर (Ultra Violet) किरणें, X–किरणें या कॉस्मिक किरणें (Cosmic rays) अथवा धमनीय (Radio-active) पदार्थों से निकलनेवाली किरणें वायु कणों को आवेशित कर देती है। वायु के ये कण बादलों के बनने के लिये नाभिक का काम करते हैं और इन पर बने बादल आवेशित रहते हैं।

4.6. **तड़ित् चालक (Lightning Conductor)**—बड़े-बड़े भवनों को तड़ित् आघात से क्षति पहुँच जाती है। तड़ित के समय स्थानीय वायु एकदम तप्त होकर भीषण उद्वेलन उत्पन्न करती है जिससे डरावना शब्द (कड़कड़ाहट) भी उत्पन्न होता है और मकान तक गिर जाते हैं। इतनी शक्तिशाली धारा इतने ऊँचे विभवान्तर पर उत्पन्न होती है कि जीवधारी नष्ट हो जाते हैं पेड़ जल जाते हैं।

भवनों को तड़ित आघात से बचाने के लिये बेंन्जामिन फ्रेंकलिन ने इस प्रकार किया: धातु की लम्बी पत्ती भवन के साथ-साथ और उससे लगभग दस गज ऊँचे तक ले जाइये। ऊपर का सिरा नुकीला कर दीजिये। नीचे पत्ती को पृथ्वी में काफी गहरा गाड़ दीजिये, इतना नीचे तक कि वहाँ नमी आ जाय।

अब यदि कोई आवेशित बादल भवन के पास आयेगा तो तड़ित् चालक की नोक पर प्रेरण से इतना अधिक आवेश उत्पन्न होगा कि वह वायु के कणों द्वारा चू-चूकर बादल

के आवेश का शून्यन कर देगा और यदि तड़ित् आघात हुआ भी तो तड़ित् चालक में होकर पृथ्वी में चला जायेगा और भवन सुरक्षित रहेगा।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. विद्युद्धर की रचना और कार्य-विधि समझाइये। "इस उपकरण का सिद्धान्त ऊर्जा अविनाशिता के नियम की अवहेलना नहीं करता।" समझाइये
2. विमशर्ट मशीन की रचना समझाइये। इसकी कार्य-विधि सुचारु रूप से वर्णन कीजिये। लीडन जार का क्या उपयोग है ?
3. बहुत अधिक ऊँचे विभवान्तर उत्पन्न करनेवाली आधुनिक मशीन का वर्णन कीजिये।
4. "वायुमंडलीय विद्युत्" पर एक टिप्पणी लिखिये।
5. "बिजली गिरना" से क्या अर्थ है ? उससे बचने के लिये ऊँचे भवनों और मीनारों में क्या प्रबन्ध किया जाता है ?
6. एक सुन्दर चित्र द्वारा विद्युद्धर की कार्य-विधि समझाइये। इस यंत्र में विद्युत्-ऊर्जा का स्रोत कहाँ पर रहता है ?

चतुर्थ प्रकरण

धारा विद्युत्

(CURRENT ELECTRICITY)

अध्याय 1

विद्युत्-धारा--प्राथमिक सेल

(Electric Current and Primary Cells)

1.1. **विद्युत् धारा**--आवेश की गति से ही विद्युत् धारा बनती है। धारा की धनात्मक दिशा वह है जिसमें धनावेश वहन करता है, परमाणु के इलैक्ट्रन सिद्धान्त में आपने देखा कि धन आवेश परमाणु के नाभिक पर और ऋणावेश बाहर परिक्रमा करनेवाले इलैक्ट्रन पर होता है। नाभिक इलैक्ट्रन से कई हजार गुना (कम-से-कम 1847गुना) भारी होता है, अतः विद्युत् धारा मुख्यतः इलैक्ट्रन के वहन से बनती है। परन्तु प्रथा के अनुसार हम फिर भी धारा की धनात्मक दिशा में धनावेश को बहता हुआ कहते हैं।

1.2. **सेल**--दो विभिन्न विभवोंवाली आवेशित वस्तुओं को एक चालक से जोड़ दो। धनावेश ऊँचे विभव से नीचे विभव की ओर तथा इलैक्ट्रन (ऋणावेश) नीचे विभव की वस्तु से ऊँचे विभव की वस्तु की ओर बहने लगेंगे। परन्तु कितनी देर तक? एक क्षण के बाद चालक के दोनों सिरों का विभव समान हो जायेगा और धारा समाप्त हो जायेगी। अतः लगातार धारा प्राप्त करने के लिये विशेष प्रबन्ध करना होगा।

वह समंजन (arrangement) जिससे चालक के दो बिन्दुओं के बीच विभवान्तर लगातार स्थिर बना रह सके **सेल** कहलाता है। ऐसा करने में लगातार विद्युत् ऊर्जा की उत्पत्ति होती रहती है जो स्वयं विद्युत् धारा बहाने में व्यय होती है।

सेल दो प्रकार की होती हैं--

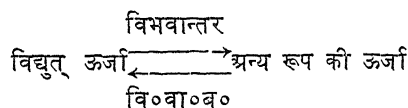
(i) **प्राथमिक सेल (Primary Cell)**--इस सेल में सेल के अवयवों से ही रसायनिक अथवा भौतिक क्रिया द्वारा अन्य प्रकार की ऊर्जा से विद्युत् ऊर्जा का प्रजनन होता है। जैसे वोल्टा सेलों में इलैक्ट्रोलाइट की रसायनिक ऊर्जा, फोटो सेल में प्रकाशी ऊर्जा से विद्युत् ऊर्जा प्राप्त होती है।

(ii) **द्वैतीयक सेल (Secondary Cell)**--इस सेल में पहले विद्युत् ऊर्जा बाहर से दी जाती है जो अवयवों में रसायनिक स्थितिज शक्ति (Chemical potential energy) के रूप में सेल में संचित रहती है और उपयुक्त रीति से पुनः विद्युत् ऊर्जा में बदलती है जैसे सीसा संचायक और क्षार संचायक। धारित्र भी विद्युत् ऊर्जा संचित करता है, परन्तु विद्युत् ऊर्जा के ही रूप में।

1.3. **विद्युत्-वाहक बल और विभवान्तर**--परिपथ (Circiut) के जिन दो बिन्दुओं के बीच विद्युत् ऊर्जा अन्य किसी रूप (form) में बदलती हो, तो उन बिन्दुओं के बीच विभवान्तर कार्य करता है।

विद्युत् वाहक बल परिपथ के उन दो बिन्दुओं के बीच कार्य करता है, जिनके बीच अन्य किसी रूप की ऊर्जा से विद्युत् ऊर्जा की उत्पत्ति होती हो। इसको इस प्रबन्ध से याद रख सकते हैं—

विभवान्तर

विद्युत् ऊर्जा ⇄ अन्य रूप की ऊर्जा

वि०वा०ब०

अन्य किस रूप की ऊर्जा से विद्युत् ऊर्जा बनती है, इस बात के आधार पर हम कई वि० वा० ब० के नाम गिना सकते हैं। जैसे—

(i) उष्मीय वि० वा० ब० (Thermo *e.m.f.*) में उष्मीय (Heat) ऊर्जा से विद्युत् ऊर्जा प्राप्त होती है।

(ii) फोटो वि० वा० ब० (Photo *e.m.f.*) में प्रकाश ऊर्जा (Light-energy; Photo=light) विद्युत् ऊर्जा में बदलती है।

1.4. **संस्पर्शीय सिद्धान्त (Contact Theory)**—गैल्वानी ने एक मेंढ़क पीतल के हुक से लोहे के तार से लटका रखा था। हवा के झोंकों से जब भी मेंढक की टाँग तार को छू जाती थी वह एक धक्का अनुभव करता था और पैर झटके के साथ पीछे हटा लेता था। गैल्वानी ने तो इसका कारण मेंढक की मास-पेशियों (Muscles) में स्थित "जीव विद्युत्" (Animal Electricity) बताया।

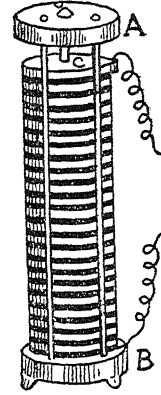
वोल्टा ने इसकी दूसरी व्याख्या दी। उन्होंने कहा कि जब भी दो असमान धातु परस्पर संस्पर्श करती हैं तो संस्पर्श वि० वा० बल (Contact *e.m.f.*) कार्य करने लगता है। ताँबे के हुक और लोहे के तार में परस्पर संस्पर्श के कारण यही वि० वा० बल उत्पन्न होता है। मेंढक का शरीर तो केवल दोनों धातुओं को जोड़नेवाला सुचालक है। इस सिद्धान्त के समर्थन में वोल्टा ने जिंक और ताँबे की बराबर-बराबर बहुत-सी प्लेटें एक के बाद एक रखकर एक गड्डी बनाई जिसे "वोल्टा की पाइल" (Volta's Pile) कहते हैं। इस गड्डी की पहली और अन्तिम ताँबे और जिंक की प्लेटों के बीच (A और B पर) एक सुग्राहक विद्युत्दर्शी जोड़ कर दिखाया कि वास्तव में विभवान्तर उपस्थित है।

इलैक्ट्रन सिद्धान्त से व्याख्या—प्रत्येक परमाणु में नाभिक के गिर्द इलैक्ट्रन परिक्रमा करते हैं। कोई इलैक्ट्रन नाभिक से जितना ही अधिक दूर होगा उतना ही कम आकर्षक बल नाभिक की ओर लगेगा। अतः बाह्यतम कक्षा के इलैक्ट्रनों का बन्धन सब से अधिक ढीला होगा। ज़रा से बल से उनको मूल परमाणु से अलग किया जा सकता है।

ठोस धातु में नाभिक तो अपने-अपने स्थानों पर स्थिर रहते हैं, बाह्यतम कक्षा के संयोजकता इलैक्ट्रन (Valency electrons) अपने-अपने मूल परमाणुओं से अलग होकर अन्तः-परमाणु (Inter-atomic) स्थान में मुक्त रूप से इधर-उधर

भटकते रहते हैं। इनका व्यवहार बिल्कुल गैस के अणुओं की भाँति होता है। गैस की भाँति यह "इलैक्ट्रान गैस" (Electron gas) भी बाहरी सीमाओं पर दबाव डालती है। इसको "इलैक्ट्रन चॉप" (Electronic Pressure) कहते हैं। ताप बढ़ने से यह चॉप बढ़ जाता है। परन्तु फिर भी कोई इलैक्ट्रन धरातल को छोड़ नहीं सकता, क्योंकि इलैक्ट्रन के निकलते ही शेष भाग धनावेशित होकर इलैक्ट्रन को पीछे खींच लेगा।

चित्र 1

इतनी मुक्त गति "नाभिक" को प्रदान करने के लिये इलैक्ट्रन के अपेक्षा कई हजार गुना बल चाहिये।

ठोस-ठोस संस्पर्श—प्रत्येक ठोस के संगत एक इलैक्ट्रन दबाव (Electronic pressure) होता है, जो ठोस विशेष का अपना स्थिरांक है। जब दो असमान इलैक्ट्रन दबाव वाले ठोस परस्पर संस्पर्श करते हैं तो संस्पर्श तल (Surface of Contact) के दोनों ओर इस दबाव के मान के समान होने की प्रवृत्ति होती है। इसके फलस्वरूप ऊँचे दबाव वाले ठोस से निकल कर कुछ इलैक्ट्रन नीचे दबाव के ठोस में चले जाते हैं। पहला ठोस धन और दूसरा ऋणावेश पाता है। अतः संस्पर्श तल के दोनों ओर एक स्थिर वि० वा० बल कार्य करने लगता है। नीचे की सारिणी में धातुयें इलैक्ट्रन दबाव के घटते हुए क्रम में दी गई हैं।

1. सोडियम, 2. मैगनीशियम, 3. जिंक, 4. सीसा (lead)
5. लोहा, 6. ताँबा, 7. चाँदी, 8. सोना और 9. प्लेटिनम।

किन्हीं भी दो धातुओं को स्पर्श कराने से सारिणी में पहले आनेवाली धातु धन और पीछे आनेवाली धातु ऋण विभव प्राप्त करेगी। एक जोड़े का विभवान्तर एक भौतिक स्थिरांक है।

ठोस-द्रव संस्पर्श—ठोस की भाँति विद्युत् चालक घोलों (जैसे अम्ल, क्षार, तेज लवणों के घोल) में भी इलैक्ट्रन दबाव होता है। अन्तर इतना है कि घुलित यौगिक घोल में जाकर दो विद्युन्मय अवयवों (आयन) में विभवत हो जाता है। एक धन आयन (Positive ion) और दूसरा ऋण आयन (Negative ion) होता है।

घोल की अपेक्षा दो प्रकार के ठोस हो सकते हैं—

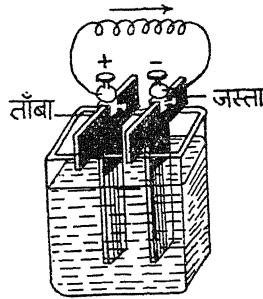
(i) एक तो वे जो घोल में घुल कर धन आयन की संख्या बढ़ावें अथवा घोल से इलैक्ट्रन खींच लें। ऐसे ठोस घोल की अपेक्षा नीचे विभव पर रहते हैं।

(ii) दूसरे वे जिन पर घोल से धन आयन निकल कर जमा हों अथवा जो घोल में अपने इलैक्ट्रन स्थानान्तरित कर दें। इस दशा में ठोस का विभव घोल की अपेक्षा ऊँचा होगा।

वास्तविक स्पर्श के समय गंधकाम्ल के घोल की अपेक्षा ज़िंक नीचे और ताँवा ऊँचे विभव पर रहता है।

नीचे की तालिका में विभिन्न धातुओं के सल्फूरिक और हाइड्रोक्लोरिक अम्लों के साथ संस्पर्श विभवान्तर वोल्ट में दिये गये हैं।

धातु	H_2SO_4 (वोल्ट)	HCl (वोल्ट)	धातु	H_2SO_4 (वोल्ट)	HCl (वोल्ट)
जिंक	−0·76	−0·54	पारा	+0·86	+0·57
			चाँदी	+0·73	+0·57
ताँबा	+0·34	+0·35	कैडमियम	−0·22	−0·24

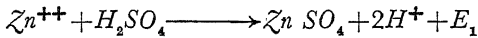
1.5. **वोल्टा की साधारण सेल (Simple Cell)**—एक काँच के बर्तन में हल्का गंधकाम्ल लीजिये। अम्ल में एक ताँबे की प्लेट और एक जिंक की प्लेट डुबा दीजिये। बस साधारण सेल तैयार हो गई। दोनों प्लेटों को तार से जोड़ने से एक विद्युत् धारा बहने लगती है और ताँबे की प्लेट पर हाइड्रोजन गैस बुलबुलों के रूप में निकलने लगती है। ताँबे की प्लेट को धन प्लेट (Positive Plate) और जिंक को ऋण प्लेट (Negative Plate) कहते हैं। बाहरी तार में विद्युत् ताँबे से जिंक प्लेट की ओर + से − को बहती है, परन्तु सेल के अन्दर जिंक (−) से ताँबे (+) की प्लेट की ओर बहती है। तार और सेल के उत्तेजक द्रव (गंधकाम्ल) का पूरा रास्ता "पूर्ण परिपथ" (Complete Circuit) कहलाता है। तारवाला भाग बाह्य परिपथ (External circuit) और सेल के अन्दर वाला भाग "आन्तरिक परिपथ" (Internal circuit) कहलाता है। धारा की शक्ति बाह्य और आन्तरिक दोनों परिपथों में समान होती है। जब तार द्वारा दोनों प्लेटों को जोड़ दिया जाता है जिससे धारा प्रवाहित होने लगे तो परिपथ बन्द (Closed) कहा जाता है, वरना खुला (Open)।

चित्र 2

खुले परिपथ (Open circuit) में दोनों प्लेटों के बीच का विभवान्तर उसके विद्युत् वाहक बल के बराबर कहा जाता है। साधारण सेल की जिंक (−) और ताँबे (+) की प्लेटों का खुले परिपथ पर विभवान्तर 1·08 वोल्ट के बराबर पाया जाता है। गत धारा की संस्पर्श विभवान्तर सारिणी से देखिये। जिंक और ताँबे का

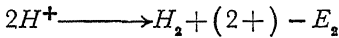
गंधकाम्ल (H_2SO_4) की अपेक्षा विभवान्तर क्रमशः $-0{\cdot}62$ वोल्ट और $+0{\cdot}46$ वोल्ट है। अतः अम्ल में डूबी हुई जिंक और ताँबे की प्लेटों का पारस्परिक विभवान्तर $[+0{\cdot}46-(-0{\cdot}62)]=1{\cdot}08$ वोल्ट ही होना चाहिये। इस प्रकार संस्पर्श सिद्धान्त का समर्थन होता है।

1.6. **साधारण सेल में ऊर्जा का स्रोत**—यदि जिंक की प्लेट पूर्णतया शुद्ध है और उसमें कोई अन्य (बाह्य) धातु के कण नहीं हैं, तो जिंक और ताँबे की प्लेटों को गंधकाम्ल में डुबाने से कोई क्रिया नहीं होगी। दोनों प्लेटों को तार से जोड़ दीजिये। धारा के बहते ही ताँबे की प्लेट पर हाइड्रोजन के बुलबुले दिखाई देंगे। स्पष्ट है कि सेल की विद्युत् ऊर्जा का स्रोत प्लेट और उत्तेजक द्रव की पारस्परिक रासायनिक क्रिया है। इसकी व्याख्या निम्न प्रकार से हो सकती है—

धारा प्रवाह के समय सेल में दो रसायनिक क्रियायें साथ साथ चलती हैं—(i) जिंक एसिड में घुलता है और दो धन हाइड्रोजन आयन मुक्त होते हैं—

$$Zn^{++}+H_2SO_4 \longrightarrow Zn\,SO_4+2H^{+}+E_1$$

इस क्रिया में E_1 ऊर्जा मुक्त होती है।

(ii) ये धन (H^+) आयन ताँबे की प्लेट को अपना धन (+) आवेश देकर उदासीन (H) परमाणु में बदल जाते हैं। और दो उदासीन परमाणु मिलकर साधारण हाइड्रोजन गैस के अणु (H_2) के रूप में सेल से बाहर आ जाते हैं।

$$2H^{+} \longrightarrow H_2+\underset{\text{धनावेश}}{(2+)}-E_2$$

इस क्रिया में E_2 ऊर्जा का शोषण होता है। परन्तु $E_1>E_2$। दोनों क्रियाओं से मुक्त होनेवाली परिणामित ऊर्जा (E_1-E_2) आन्तरिक परिपथ में धनावेश (H^+ आयन) को नीचे विभव (Zn प्लेट) से ऊँचे विभव (Cu प्लेट) पर स्थानान्तरित करने में व्यय होती है। इस प्रकार सम्पादित कार्य (work) सेल की विद्युत्-स्थितिज ऊर्जा (Electrical Potential Energy) के रूप में एकत्रित हो जाती है। इसीसे सेल के वि० वा० बल की उत्पत्ति होती है।

परिपथ बन्द करने पर धन (+) आवेश बाह्य परिपथ में ऊँचे विभव (Cu) से नीचे (Zn) विभव की ओर चलता है। इस वहन क्रिया में सेल की विद्युत् स्थितिज ऊर्जा लगातार विद्युत् गतिज ऊर्जा में बदल जाती हैं जो स्वयं परिस्थिति के अनुसार यांत्रिक ऊर्जा (विद्युत् मोटर) उष्मा ऊर्जा (बल्व या हीटर) आदि में बदल सकती है। इस ऊर्जा की कमी को पूरा करने के लिये और अधिक जिंक घुलता है और मुक्त रसायनिक ऊर्जा सेल की स्थितिज ऊर्जा (वि० वा० बल) बढ़ाती है। इस प्रकार सेल से धारा बहती रहती है और जिंक लगातार घुलता रहता है।

वास्तव में तो धारा वहन में जिंक प्लेट से ताँबे की प्लेट की ओर इलैक्ट्रन बहते हैं। परन्तु प्रथा के अनुसार हम मानते यही हैं कि (+) धनावेश ताँबे से जिंक की ओर बहता है।

1.7. **साधारण सेल के दोष (Defects)**—इसमें दो मुख्य दोष होते हैं—(i) स्थानीय क्रिया (Local action), (ii) ध्रुवण (Polarization)।

(i) **स्थानीय क्रिया**—आदर्श और निर्दोष अवस्था में जिंक केवल उसी समय घुलना चाहिये जब कि बाह्य परिपथ में धारा बह रही है। यदि जिंक पूर्णतया शुद्ध हो, तो होगा भी ऐसा ही। परन्तु व्यापारिक जिंक में लोहा, संखिया (Arsenic), कार्बन या सीसा (lead) के कण अशुद्धि के रूप में उपस्थित रहते हैं। दो असमान चालकों के कण जिनमें से एक जिंक होता है, सेल के उत्तेजक घोल (Active solution) के सम्पर्क में आ कर एक सूक्ष्म स्थानीय सेल (Local cell) बना देते हैं। जिंक की प्लेट इस सैल के परिपथ को बन्द करने का काम करती है। जिससे स्थानीय धारायें (Local currents) लगातार बहती रहती हैं, जिंक फलतः लगातार खर्च होता रहता है; चाहे बाह्य परिपथ बन्द हो या खुला। इन स्थानीय धाराओं का मुख्य धारा के साथ कोई योग नहीं होता। अतः जिंक खर्च बिना किसी लाभ के होता रहता है।

निराकरण (Remedy)—जिंक की छड़ (Zinc Rod) को हल्के गंधकाम्ल में भिगोकर और रगड़ कर साफ करने के बाद एक कपड़े की सहायता से शुद्ध पारा मल दीजिये। पारे (Mercury) की एक पतली तह जम जायेगी। इस क्रिया को संरसन (Amalgamation) कहते हैं। जिंक घुल कर पारे की सतह पर आ जाता है अशुद्धियाँ इस तह के अन्दर रह जाती हैं। अम्ल में डुबाने पर केवल जिंक ही सम्पर्क में आता है, अशुद्धियाँ अम्ल को स्पर्श नहीं कर पातीं। जब पारे में घुला हुआ जिंक धारा बहने पर अम्ल में चला जाता है, तो अन्दर से और जिंक आ जाता है। इस प्रकार धारा प्रवाह जारी रहने पर अन्त में अशुद्धियाँ नीचे तलछट के रूप में गिर जाती हैं।

(ii) **ध्रुवण**—एक निर्दोष सेल में रसायनिक क्रिया से उत्पन्न हुई हाइड्रोजन अपना धनावेश धन प्लेट को देकर फौरन बाहर निकल जानी चाहिये। परन्तु वास्तव में हाइड्रोजन जिस दर से उत्पन्न होती है उतनी शीघ्रता से बाहर निकल नहीं पाती। इससे धन प्लेट पर उदासीन हाइड्रोजन की एक पर्त लग जाती है और परिपथ में विद्युत् धारा कम हो जाती है। परिपथ में लगी विद्युत् घंटी पहले तो ज़ोर से बजती है, परन्तु बाद में धीरे-धीरे मन्द होते-होते बन्द हो जाती है। इस "ध्रुवण" (Polarization) की व्याख्या इस प्रकार हो सकती है—

(a) उदासीन हाइड्रोजन विद्युत् अचालक है। अतः इसकी पर्त धन प्लेट पर जमा होने से सेल का कुल आन्तरिक प्रतिरोध बढ़ जाता है और परिपथ में धारा कम हो जाती है।

(b) उदासीन पर्त के कारण आनेवाले हाइड्रोजन धन (H^+) आयन अपना धनावेश प्लेट को नहीं दे पाते और वहीं पर उदासीन पर्त के आगे धन प्लेट के गिर्द धनावेश की दूसरी पर्त बना देते हैं। यह धनावेश बाद में आनेवाले धन आयनों को पीछे प्रतिकर्षित करते हैं। इनका यह विकर्षण एक "विपरीतात्मक वि० वा० बल" (Back *e.m.f.*) के समतुल्य होता है। जैसे-जैसे समय बीतता जाता है धनावेश की पर्त मोटी और शक्तिशाली होती जाती है। विपरीतात्मक वि० वा० बल बढ़ता जाता है और सेल का कुल प्रभाविक वि० वा० बल घटता जाता है। होते-होते एक समय विकर्षण इतना बढ़ जाता है कि उसके बाद आनेवाला हाइड्रोजन आयन धन प्लेट की ओर बढ़ने भी नहीं पाता। विपरीतात्मक वि० वा० बल इस समय सेल के वास्तविक क्रियात्मक वि० वा० बल के बराबर और विपरीत हो जाता है। धारा बिल्कुल बन्द हो जाती है और सेल पूर्णतया ध्रुवित (Polarized) हो जाती है।

निराकरण (Remedy)—हाइड्रोजन की अचालक पर्त को धन प्लेट पर जमा होने से रोकने के निम्न उपाय किये जाते हैं—

(a) **यांत्रिक (Mechanical)**—ताँबे की प्लेट को प्रयोग के समय थोड़ी-थोड़ी देर के बाद निकाल कर ब्रुश से साफ कर दीजिये। अथवा प्लेट के धरातल को प्लेटीनम के कण जमा कर या अन्य रीति से खुरदरा कर दीजिये। हाइड्रोजन को जमा होने में कठिनाई होगी। (उदाहरण—स्मी सेल)

(b) **रासायनिक (Chemical)**—किसी "आक्सी-कारक" (Oxidizing Agent) के द्वारा उत्पन्न होने वाली हाइड्रोजन को पानी में बदल दीजिये। इस प्रकार प्रयुक्त आक्सीकारक को निध्रुवक (Depolarizer) कहते हैं।

उदाहरण—लैक्लांशी सेल में मैगनीज़ डाइआक्साइड (MnO_2), बाइक्रोमेट सेल में पोटैशियम बाइक्रोमेट निध्रुवक हैं।

(c) **विद्युत् रासायनिक (Electro-Chemical)**—सेल में दो घोल प्रयोग किये जाते हैं। पहले घोल में उत्पन्न होकर जब दूसरे घोल में हाइड्रोजन पहुँचती है, तो रसायनिक क्रिया से ऐसे धन आयन निकलते है, जिनसे धनात्मक प्लेट बनी है। (उदाहरण—डैनियल सेल) अथवा ऐसी गैस निकलती है, जो धन प्लेट पर अचालक पर्त नहीं जमाती। (जैसे—बुनसन-सेल)।

हाइड्रोजन को इस प्रकार दूर करनेवाले रसायन (Chemicals) भी निध्रुवक (depolarizer) कहलाते हैं।

1.8. **वोल्टाइक सेलें (Voltaic Cells)**—गत धारा के अनुसार एक वोल्टाइक सेल के चार मुख्य अवयव होते हैं—

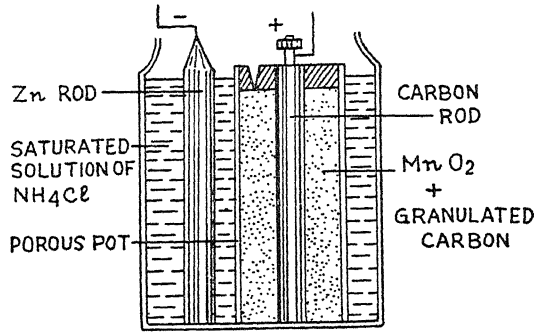
(i) **धन प्लेट** (Positive Plate)

(ii) **ऋण प्लेट** (Negative Plate)

(iii) **उत्तेजक घोल** (Active Solution)

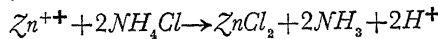
(iv) **निध्रुवक** (Depolarizer)

मुख्य वोल्टाइक सेलों का वर्णन नीचे दिया जाता है—

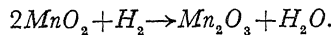
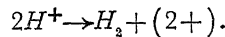
1. **लैक्लांशी सेल (Leclanche Cell)**—एक काँच के बर्तन में नौसादर (Ammoniun Chloride) का संतृप्त घोल भरा रहता है। संरसित (amalgamated) जिंक की छड़ इस घोल में खड़ी रहती है (चित्र 3)। एक रंध्रमय (Porous) बर्तन में मैगनीज़ डाइआक्साइड और कार्बन चूर्ण थोड़े से गोंद

चित्र 3

में मिला कर भर देते हैं। बर्तन के बीच में एक कार्बन की छड़ लगी रहती है। कार्बन की छड़ धन और जिंक ऋण प्लेट की तरह काम करती हैं। दोनों में एक-एक पीतल का पेंच लगा रहता है।

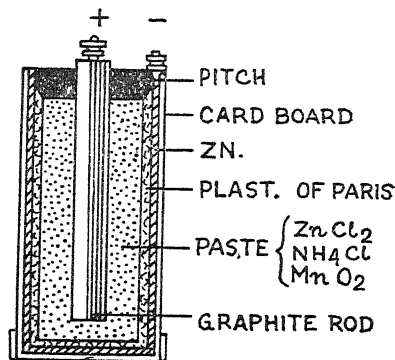
रासायनिक क्रिया—जिंक और नौसादर की क्रिया से अमोनिया और हाइड्रोजन गैस बनती हैं—

$$Zn^{++}+2NH_4Cl \rightarrow ZnCl_2+2NH_3+2H^+$$

अमोनिया (NH_3) तो घोल में घुल जाती है और बाद में वायुमंडल में चली जाती है। हाइड्रोजन आयन (H^+) रंध्रमय बर्तन की दीवार के छेदों में हो कर अपना धनावेश कार्बन छड़ को देने के बाद मैगनीज़ डाइआक्साइड से क्रिया करती है—

$$2H^+ \rightarrow H_2+(2+).$$

$$2MnO_2+H_2 \rightarrow Mn_2O_3+H_2O.$$

मैगनीज़ डाइआक्साइड क्योंकि ठोस है, अतः इसकी आक्सीकारक क्रिया धीरे-धीरे होती है। थोड़ी देर प्रयोग के बाद सैल ध्रुवित हो जाती है। अतः यह केवल ऐसे कामों में आती है जहाँ रुक-रुक कर धारा चाहिये जैसे विद्युत् घंटी बजाने या टेलीफोन में।

लैक्लांशी सैल का वि० वा० बल लगभग 1·45 वोल्ट होता है।

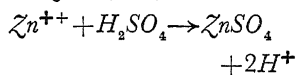
2. **सूखी सेल (Dry cell)** (चित्र 4)—लैक्लांशी सेल से यह केवल इस बात में भिन्न है कि इसमें नौसादर के घोल की जगह नौसादर की लेई उत्तेजक रसायन है। जिंक छड़ की जगह जिंक की चादर का बना बर्तन ही ऋण प्लेट का काम करता है।

चित्र 4

ग्रेफाइट की छड़ के चारों ओर मैंगनीज़ डाइआक्साइड कार्बन चूर्ण और जिंक क्लोराइड की लेई होती है। उसके चारों ओर प्लास्टर आफ पेरिस की तह और बाद में नौसादर, प्लास्टर आफ पेरिस और जिंक क्लोराइड की लेई होती है। इसके बाद—जिंक का बर्तन जिसके चारों ओर मोटे कागज़ (Card Board) का घेरा होता है। ऊपर पिच (Pitch) की तह होती है जिसमें अमोनिया गैस के निकलने के लिये छेद होता है। इसका प्रयोग टार्च, रेडियो आदि में होता है।

3. **बाइक्रोमेट (Bichromate) सेल** (चित्र 5)—काँच के बर्तन में गंधकाम्ल (उत्तेजक घोल) और पोटैशियम बाइक्रामेट (निध्रुवक) का मिश्रण रहता है। इसमें एक जिंक छड़ (ऋण) और उसके दोनों ओर दो कार्बन छड़ (धन) लटकी रहती है।

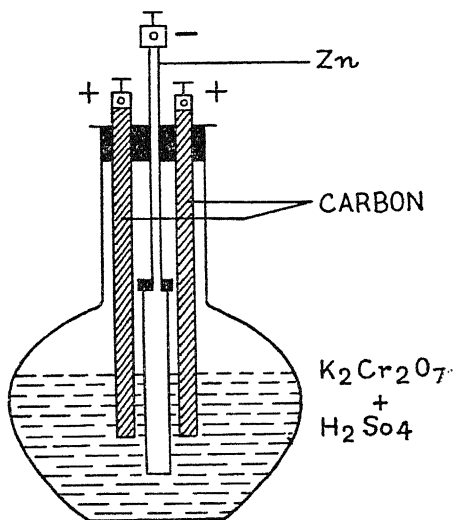
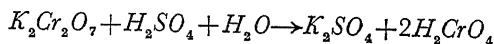
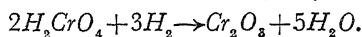
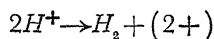
चित्र 5

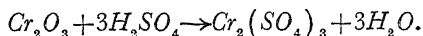
क्रिया—पहले जिंक और गंधकाम्ल की क्रिया से दो हाइड्रोजन आयन मुक्त होते हैं

$$Zn^{++}+H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + 2H^+$$

गंधकाम्ल और पोटैशियम बाइक्रोमेट की क्रिया से बने क्रोमिक एसिड से $2H^+$ निरावेशित होने के बाद क्रिया करती है—

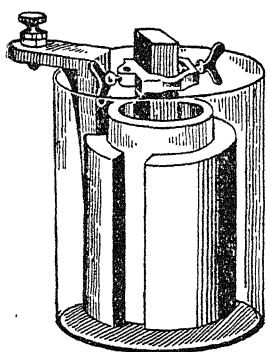
$$K_2Cr_2O_7+H_2SO_4+H_2O \rightarrow K_2SO_4+2H_2CrO_4$$

$$2H^{+} \rightarrow H_2 + (2+)$$

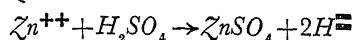
$$2H_2CrO_4 + 3H_2 \rightarrow Cr_2O_3 + 5H_2O.$$

यह क्रोमिक आक्साइड गंधकाम्ल से क्रोमिक सल्फेट बनाता है

$$Cr_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3H_2O.$$

क्रोमियम सल्फेट और पोटैशियम सल्फेट पानी से मिल कर क्रोम एलम (फिटकरी) $[K_2SO_4, Cr_2 (SO_4)_3, 24(H_2O)]$ बनाते हैं जो रवों के रूप में नीचे जम जाते हैं।

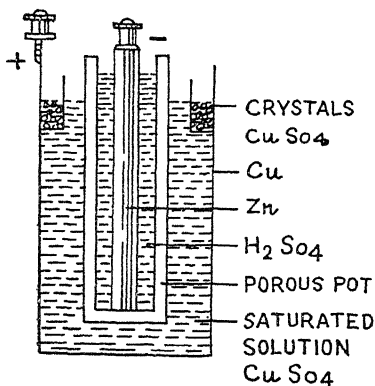
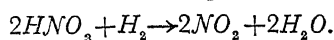
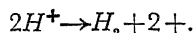
वि० वा० बल लगभग 1·7 वोल्ट होता है।

4. **बुनसन सेल (Bunsen cell)** (चित्र 6)—इसमें उत्तेजक घोल गंधकाम्ल एक शीशे के बर्तन में रहता है जिसमें ऋण जिंक प्लेट पड़ी रहती है। बीच में एक रंध्रमय बर्तन में गाढ़ा शोरे का अम्ल (निध्रुवक) रहता है जिसमें कार्बन (धन) छड़ रहती है।

चित्र 6

क्रिया—जिंक और हल्के गंधकाम्ल से $2H^{=}$ मिलते हैं—

$$Zn^{++} + H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4 + 2H^{=}$$

हाइड्रोजन आयन रंध्रमय बर्तन में घुस कर अपना धनावेश धन प्लेट को देते हैं। निरावेशित होकर शोरे के अम्ल से क्रिया होती है—

$$2H^{+} \rightarrow H_2 + 2+.$$

$$2HNO_3 + H_2 \rightarrow 2NO_2 + 2H_2O.$$

यह नाइट्रोजन परआक्साइड (NO_2) पहले तो अम्ल में घुलती रहती है बाद में बादामी वाष्प के रूप में बाहर निकलती है। इसकी गंध बड़ी अप्रिय और स्वास्थ्य के लिये अहितकर होती है।

प्रयोग न करते समय रंध्रमय बर्तन को बाहर निकाल देना चाहिये वरना शोरे का अम्ल छिद्रों से निकल कर जिंक प्लेट को खा जायेगा।

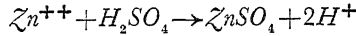
वि० वा० बल 1·8 वोल्ट है।

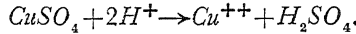
चित्र 7

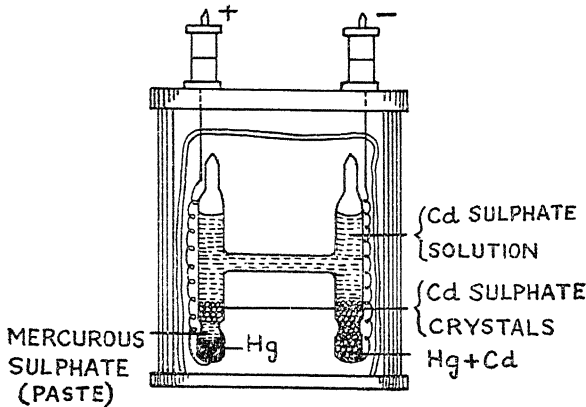
5. **डैनियल सेल (Daniel Cell)** (चित्र 7)—रंध्रमय बर्तन (Porous pot) के अन्दर हल्के गंधकाम्ल (उत्तेजक घोल) में जिंक (ऋण) छड़

रहती है। यह बर्तन एक ताँबे के बेलनाकार बर्तन (धन) में भरे हुए नीला थोथा ($CuSO_4$) के संतृप्त घोल (निध्रुवक) में रखा रहता है। ताँबे के बर्तन के ऊपर कुछ रवे नीलाथोथा के रखे रहते हैं जो घोल को सदैव संतृप्त रखते हैं।

क्रिया—पोरस पाट के भीतर जिंक और गंधकाम्ल की क्रिया से धनावेश मुक्त होता है।

$$Zn^{++}+H_2SO_4 \rightarrow ZnSO_4+2H^+$$

ये हाइड्रोजन आयन रंध्रमय बर्तन के छिद्रों से होकर बाहर जाते हैं और निध्रुवक घोल से ताम्र आयन (Cu^{++}) मुक्त करते हैं—

$$CuSO_4+2H^+ \rightarrow Cu^{++}+H_2SO_4.$$

ताम्र आयन अपना धनावेश देकर धन प्लेट पर ही जमा हो जाते हैं। अतः इसमें विपरीतात्मक वि० वा० बल उत्पन्न नहीं होता। इसका वि० वा० बल लगभग स्थिर (1·1 वोल्ट) रहता है।

6. **प्रामाणिक कैडमियम सेल** (चित्र 8)—इस सेल का वि० वा० बल प्रायः स्थिर रहता है। इसी लिये इसको प्रामाणिक माना जाता है।

चित्र 8

रचना—अंग्रेजी के H अक्षर की आकृति के काँच के बर्तन की एक भुजा में शुद्ध पारा (धन) रहता है। दूसरी भुजा की पेंदी में पारा और कैडमियम का संरस (amalgam) ऋण प्लेट का काम करता है। उत्तेजक द्रव कैडमियम सल्फेट ($CdSO_4$) का संतृप्त घोल है और निध्रुवक मरक्यूरस सल्फेट (Hg_2SO_4)। इसीलिये धन (पारा) सिरे पर Hg_2SO_4 और $CdSO_4$ के रवे रखे रहते हैं तथा ऋण (पारा+संरस कैडमियम) भुजा में भी $CdSO_4$ के कण रहते हैं जो दोनों भुजाओं में भरे $CdSO_4$ घोल को संतृप्त बनाये रहते हैं।

$20^\circ C$ पर इसका वि० वा० बल 1·0183 वोल्ट होता है। ताप बढ़ने पर वि० वा० वल कुछ गिर जाता है। किसी भी ताप पर

$$E_t = 1{\cdot}0183 - 40{\cdot}6\ (t-20) \times 10^{-6}$$ वोल्ट होता है।

प्रामाणिक सेल से 0·1 मिली एम्पियर से अधिक धारा नहीं लेनी चाहिये। इसी लिये सेल के श्रेणीक्रम में एक ऊँचा प्रतिरोध लगा देते हैं। वास्तव में प्रामाणिक सेल प्रामाणिक वि० वा० बल के स्रोत हैं। विद्युत् धारा के स्रोत की तरह इसका प्रयोग निषिद्ध है।

7. **क्लार्क प्रामाणिक सेल**—लैतिमार क्लार्क सेल भी कैडमियम सेल की भाँति होती है। केवल इसमें अन्तर इतना है कि कैडमियम की जगह शुद्ध जिंक होता है।

$15^\circ C$ पर वि० वा० बल 1·433 वोल्ट होता है। ऊँचे ताप पर वि० वा० बल

$$E+ = 1{\cdot}433 - 12 \times (t-15) \times 10^{-4}$$ वोल्ट होता है।

सारांश

जब दो असमान धातुयें संस्पर्श करती हैं तो असमान इलैक्ट्रन दबाव के कारण संस्पर्श तल पर एक वि० वा० बल उत्पन्न होता है।

वोल्टा की साधारण सेल में (i) स्थानीय क्रिया और (ii) ध्रुवण के दोष होते हैं। ध्रुवण का निराकरण करने के लिये निध्रुवक का प्रयोग होता है।

1. लक्लांशी सेल, डैनियल ल, बाइक्रोमेट सेल आदि प्राथमिक सैल हैं।
2. वेस्टन की कैडमियम सेल और क्लार्क सेल प्रामाणिक सैल हैं।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. वि० वा० बल और विभवान्तर के अन्तर को स्पष्ट कीजिये। प्राथमिक और द्वैतीयक सेल से आप क्या समझते हैं?
2. संस्पर्श सिद्धान्त की व्याख्या कीजिये।
3. साधारण सेल में कौन-कौन दोष होते हैं? इनको किस प्रकार दूर किया जा सकता है। उदाहरण सहित समझाइये।
4. किसी प्रामाणिक सेल की रचना का वर्णन कीजिये। इसका क्या प्रयोग होता है? इनकी प्रामाणिकता के मूल आधार क्या हैं?
5. डैनियल और लक्लांशी सेल की क्रिया विधि समझाइये। सेल में ऊर्जा कहाँ से आती है?
6. एक ताँबे की और दूसरी जस्ते की प्लेट ऐसे बर्तन में डाल दी जाती हैं, जिनमें हल्का गन्धक का तेज़ाब पड़ा है। इन प्लेटों को किसी धारामापी (Galvanometer) के छोरों से जोड़ दिया जाता है, जिसकी सुई विचलित होती है। यह विचिलन धीरे-धीरे घटता जाता है। ऐसा क्यों होता है? कौन-कौन से आयोजनों से यह दोष दूर हो सकता है?
7. द्वितरल ((Two fluid cells) के छोरों (Terminals) को जोड़ने से पहले और बाद की रासायनिक क्रियाएँ समझाइये। इस प्रकार का सैल किन बातों में सामान्य सैल से श्रेष्ठ होता है?

8. निम्न सेलों के गुण दोषों की समीक्षा करिए, (i) डैनियल सेल, (ii) लैक्लांशी सेल और (iii) संचायक सेल (accumulator)।
9. स्थानीय क्रिया और ध्रुवण में क्या अन्तर है? विद्युत् रासायनिक (Electro-chemical) साधनों द्वारा ध्रुवण को किस प्रकार दूर किया जाता है?
10. सकारण समझाओ (i) बिजली की घंटियों के लिये लैक्लांशी सेल अधिक उपयुक्त है।
    (ii) डैनियल सेल में तूतिया के घोल का गाढ़ा रहना आवश्यक है।
    (iii) प्रामाणिक सेल और द्वैतीयिक (Secondary) सेलों में कौन अधिक श्रेष्ठ है, और क्यों?

अध्याय 2

विद्युत् धारा के चुम्बकीय प्रभाव

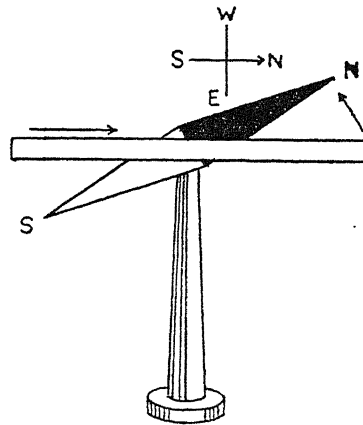
(Magnetic Effects of Current)

2.1. जब तक विद्युत् आवेश स्थिर रहता है, उसका और एक चुम्बकीय क्षेत्र का परस्पर कोई प्रभाव नहीं होता। परन्तु जसे ही आवेश चलना प्रारम्भ करता है, उसकी गति दिशा के अभिलम्ब एक चुम्बकीय क्षेत्र की सृष्टि हो जाती है। विद्युत् धारा (गतिमान आवेश) से सम्बन्धित (associated) इस चुम्बकीय क्षेत्र के कारण ही विद्युत् धारा और अन्य चुम्बकीय क्षेत्रों में परस्पर प्रतिक्रिया होती है। विज्ञान की इस शाखा को **विद्युत गति विज्ञान** (Electro-dynamics) कहते हैं।

2.2. इस दिशा में सर्वप्रथम खोजात्मक प्रयोग कोपन हैगन के वैज्ञानिक औरस्टेड (Oersted) ने किया।

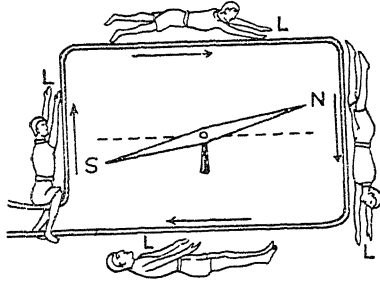
निर्विक्षेपित और शान्त चुम्बकीय सुई NS के ऊपर और समानान्तर रखे हुए ताँबे के तार में विद्युत् धारा बहाइये। सुई चुम्बकीय याम्योत्तर से हट जायेगी। स्पष्ट है कि धारा ने सुई को प्रभावित करके याम्योत्तर के समकोणिक एक बल लगाया है।

चित्र 9

विक्षेप की दिशा जानने के लिये अंग्रेजी के शब्द $SNOW$ को याद रखिये। यह शब्द बताता है कि यदि धारा S (दक्षिण)

से N (उत्तर) दिशा में सुई के ऊपर (over) बहे तो सुई का उत्तरी ध्रुव पश्चिम (West) की ओर मुड़ जायेगा।

चित्र 10

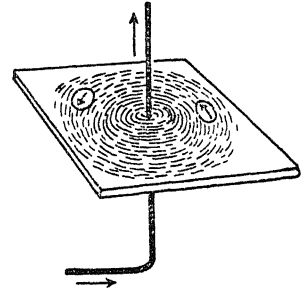
2.3. एम्पियर का बायें हाथ का नियम (Ampere's left hand rule)—क्षेत्र की दिशा ज्ञात करने के लिये एम्पियर ने निम्न नियम दिया—

"सदैव सुई की ओर मुँह करके तार के साथ धारा की दिशा में तैरने की कल्पना कीजिये। सुई का उत्तरी ध्रुव सदैव आपके बायें हाथ की ओर विक्षेपित होगा।"

2.4. ऋृजुरेखीय धारा से सम्बन्धित क्षेत्र—क्षैतिज कार्डबोर्ड पर एक काग़ज़ लगा दीजिये और उसके केन्द्र से जानेवाले ऊर्ध्व ताँबे के तार में विद्युत् धारा बहाइये। एक छोटी सी चुम्बकीय कम्पास सुई की सहायता से बल रेखायें खींचिये।

चित्र 11

आप देखेंगे कि यदि धारा नीचे से ऊपर जा रही है, तो बल रेखाओं का रूप वामावर्त समकेन्द्रीय वृत्तों का समुदाय होगा।

2.5. मैक्सवैल का कार्क पेच नियम (Cork Screw Rule)—मैक्सवैल ने बल रेखाओं की दिशा के लिये यह नियम दिया—"दक्षिणावृत्त (right handed) कार्क पेंच की अक्ष धारा से मिला दीजिये। पेंच ऐसा घुमाइये कि वह धारा की दिशा में बढ़े। अँगूठे की गति की दिशा बल रेखाओं की दिशा होगी।

चित्र 12

किसी धारावाही चालक पर चुम्बकीय क्षेत्र में जो यांत्रिक धक्का लगता है, उसे **बार्लो के चक्र** द्वारा दिखाया जा सकता है।

यह एक सितारेनुमा ताँबे का मंड़लक होता है, जो दो क्षैतिज भुजाओं के बीच उदग्र स्थिति में ठहरी रहती है। ये भुजाएँ एक उदग्र स्तम्भ से सम्बद्ध रहती हैं। पहिया स्वतन्त्र रूप से एक क्षैतिज अक्ष पर घूम सकता है। उसके नीचे एक छोटा पारे का प्याला रहता है। उसकी एक

नोक पारे के तल को संस्पर्श करती है। पारे का प्याला एक संयोजक पेंच से एक तार द्वारा जुड़ा रहता है, और स्तम्भ एक दूसरे संयोजक पेंच से जुड़ा रहता है, जो लकड़ी के आधार में बना रहता है। एक घोड़े की नाल के आकार का विद्युत् चुम्बक इस प्रकार क्षैतिज स्थिति में व्यवस्थित रहता है कि उसके ध्रुव पारे के प्याले के आमने-सामने के किनारों पर रहते हैं।

जब संयोजक पेंचों को बैटरी के छोरों से जोड़ा जाता है, तो पहिया चक्कर करने लगता है। मान लो कि बैटरी का धनात्मक छोर संयोजक पेंच से जुड़ा है। तब धारा स्तम्भ की ओर बहती है, और वहाँ से वह अक्ष में से होती हुई पहिये तक जाती है, तब वह नीचे रखे हुए पारे के प्याले में जाती है, जहाँ से वह ऋणात्मक छोर में जाती है।

पहिया घूमने लगता है और उसकी भिन्न-भिन्न नोकें, पारे के तल को बारी-बारी से संस्पर्श करती रहती हैं। जब तक धारा जारी रहती है, तब तक पहिया घूमता रहता है। धारा की दिशा या चुम्बकीय क्षेत्र की दिशा उलटने से पहिये के घूमने की दिशा भी उलट जाती है।

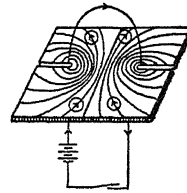
2.6. **फैरेडे** (Faraday) **का प्रयोग**—चुम्बकीय बल रेखाओं की परिभाषा के अनुसार एक स्वतन्त्र चुम्बकीय ध्रुव उन पर चलना चाहिये। स्वतन्त्र चुम्बकीय ध्रुव प्राप्त करना असम्भव है। परन्तु फैरेडे ने एक चुम्बक को बीच में दो बार समकोण पर मोड़ कर एक ऋजु रेखीय धारा के गिर्द चुम्बक को घुमा कर दिखाया। चुम्बक बीच में लगी चूल पर घूमता था, और धारा ऊर्ध्व दिशा में चुम्बक की लम्बाई के समानान्तर उसकी परिभ्रमण अक्ष के साथ बहाई गई। इस प्रयोग से चुम्बकीय क्षेत्र की उपस्थिति और दिशा बिल्कुल स्थापित हो गई।

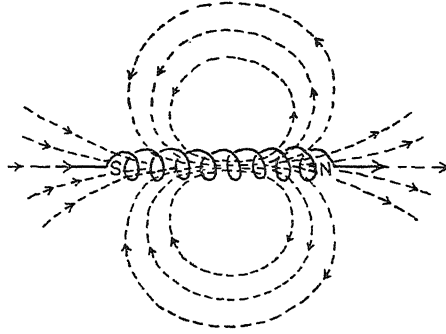
2.7. **वृत्ताकार धारा का चुम्बकीय क्षेत्र**—एक क्षैतिज तख्ते पर काग़ज़ लगाइये। दो छेदों में हो कर एक वृत्ताकार तार को निकाल कर चित्र 13 की भाँति एक बैटरी से विद्युत् धारा बहाइये।

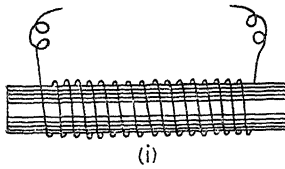
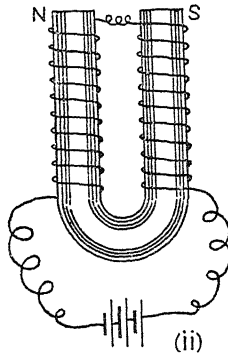
चित्र 13

चुम्बकीय कम्पास की सहायता से बल रेखायें खींचिये। चित्र की भाँति प्राप्त होंगी।

चित्र से स्पष्ट है कि तारों के पास तो बल रेखायें लगभग वृत्त हैं। तारों से हटने पर वक्रता कम होती जाती है। केन्द्र के समीप बल रेखायें समान्तर ऋजु रेखाओं के रूप में है। अतः केन्द्र पर चुम्बकीय क्षेत्र लगभग सम (uniform) है, और उसकी दिशा वृत्ताकार धारा के तल से समकोणिक है।

वास्तव में वृत्ताकार धारा एक चुम्बकीय कवच (Magnetic Shell) की भाँति व्यवहार करती है। कवच का उत्तरी ध्रुव उस ओर है जिधर से देखने पर धारा की

दिशा वामावर्त (Anti-clockwise) प्रतीत हो। जिस मुखपृष्ठ (face) पर धारा की दिशा दक्षिणावर्त (clockwise) है वह कवच का दक्षिणी ध्रुव है।

2.8. **परिनलिका** (Solenoid) **की धारा का चुम्बकीय क्षेत्र**—परिनालिका

चित्र 14

कई वृत्ताकार कुंडलियों से मिलकर बनती है जिनमें धारा एक ही दिशा में बहती है। अतः परिनालिका एक छड़ चुम्बक की भाँति कार्य करेगी। उसकी बल रेखायें चित्र 14 की भाँति होंगी।

चित्र 15

परिनालिका के दोनों सिरों पर ध्रुवों की पहिचान के लिये यह परीक्षण कीजिये—परिनालिका को अपने बायें हाथ में इस प्रकार पकड़िये कि उँगलियाँ धारा की दिशा में मुड़ें तो हाथ का अँगूठा उत्तरी ध्रुव की ओर इशारा करेगा।

इसके अतिरिक्त आप घड़ी की सुइयों के नियम से भी ध्रुव ज्ञात कर सकते हैं।

2.9. **विद्युत् चुम्बक**—परिनालिका के अन्दर यदि कच्चे लोहे के बहुत से तार एकसाथ बाँधकर नलिका की अक्ष के समान्तर रख दें तो परिनालिका के चुम्बकीय क्षेत्र से लोहे के तार चुम्बकित हो जायेंगे। इस प्रकार विद्युत् से बने चुम्बक को विद्युत्-चुम्बक कहते हैं। विद्युत् चुम्बक की शक्ति परिनालिका की 1 सें० मी० लम्बाई में कुल चक्करों की संख्या और विद्युत् धारा की शक्ति के गुणनफल के समानुपाती होती है। इस गुणनफल को चुम्बक का "एम्पियर टर्न" (Ampere Turn) कहते हैं।

इच्छानुसार विभिन्न आकृति में कच्चे लोहे के तार या छड़ को मोड़ कर उसके ऊपर तार लपेट कर विद्युत् धारा से विद्युत् चुम्वक बनाया जा सकता है।

चित्र 15 (i) में एक विद्युत् छड़ चुम्बक और चित्र 15 (ii) में एक नाल चुम्बक दिखाया गया है।

आधुनिक खोजों में बड़े शक्तिशाली चुम्बकीय क्षेत्रों की आवश्यकता पड़ती है। ये सब विद्युत् चुम्बकों से ही उत्पन्न किये जाते हैं। नाल चुम्बक के ध्रुवों के बीच क्षेत्र की तीव्रता ध्रुवों की आकृति और वक्रता से भी प्रभावित होती है। रूस के एक वैज्ञानिक कैपिट्ज़ा (Kapitza) ने हाल ही में विद्युत् चुम्बक की सहायता से बहुत शक्तिशाली क्षेत्र प्राप्त किया है।

2.10 **लाप्लास का प्रमेय (Laplace's Theorem)**—ऋजु रेखीय तार AB में i शक्ति की धारा बह रही है (चित्र 16)। धारा के अवयव CD (लम्वाई l) द्वारा P पर चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता के लिये लैप्लेस ने प्रयोगों द्वारा सिद्ध किया कि तीव्रता (i) i धारा शक्ति के समानुपाती है। (ii) l धारा अवयव की लम्बाई के समानुपाती होती है।

(iii) Sin θ के समानुपाती है। θ धारा की दिशा और अवयव के मध्य बिन्दु को P से मिलाने वाली ऋजु रेखा के बीच का कोण है।

चित्र 16

(iv) r^2 के व्युत्क्रमानुपाती है। r अवयव की P से दूरी है।

सब को मिला कर P पर क्षेत्र की तीव्रता

$$F \propto \frac{il \sin \theta}{r^2}$$

$$= K\frac{il \sin \theta}{r^2}$$

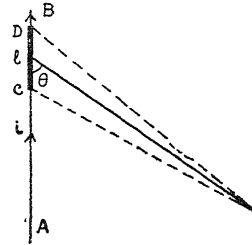
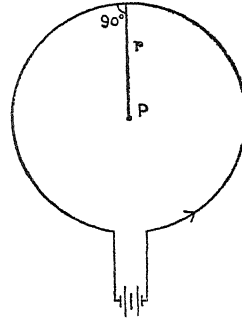
K एक समानुपाती स्थिरांक है जिसका मान धारा (i) की नापने की इकाई पर निर्भर करता है।

क्षेत्र की दिशा उस तल के समकोणिक होती है जिसमें l और r स्थित हैं।

2.11. **वृत्ताकार कुंडली के केन्द्र पर क्षेत्र**—चित्र 17 में i शक्ति की विद्युत् धारा r सें० मी० त्रिज्या के वृत्त में वामावर्त दिशा में बहती है।

चित्र 17

धारा अवयव की कुल लम्बाई = वृत्त की परिधि

$= 2\pi r$ सें० मी०

परिधि के प्रत्येक बिन्दु के लिये केन्द्र से दूरी त्रिज्या के बराबर है और त्रिज्या तथा परिधि के बीच का कोण 90° है।

अतः लैप्लेस के नियमानुसार P पर क्षेत्र की तीव्रता,

$$F = K\frac{i \times 2\pi r \times \sin 90^\circ}{r^2}$$

$$\therefore \qquad F = K\frac{2\pi i}{r} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

इस क्षेत्र की दिशा कुंडली के तल से समकोणिक होगी।

धारा की विद्युत् चुम्बकीय इकाई (Electro-magnetic Unit)—

समीकरण (1) में यदि $r=1$, $i=1$ और $F=2\pi$ रख दें, तो,

$$2\pi = K\frac{2\pi \times 1}{1}$$

और $K=1$ हो जाता है।

इस समय धारा (i) की शक्ति एक विद्युत् चुम्बकीय इकाई कहलाती है। और केन्द्र पर क्षेत्र की तीव्रता,

$$F = \frac{2\pi i}{r} \text{ औरस्टेड हो जाती है।}$$

अतः एक विद्युत् चुम्बकीय इकाई शक्ति की धारा 1 सें० मी० अर्द्धव्यास के वृत्त में बह कर केन्द्र पर 2π औरस्टेड का चुम्बकीय क्षेत्र उत्पन्न करती है।

धारा की व्यवहारिक इकाई एम्पियर (Ampere) है।

अब धारा = आवेश प्रवाह की दर

$$= \frac{\text{प्रवाहित आवेश}}{\text{समय}}$$

$$\therefore \text{ एम्पियर} = \frac{\text{कूलम्ब}}{\text{सेकिंड}}$$

एक एम्पियर की धारा ले जानेवाले तार के प्रत्येक अनुप्रस्थ क्षेत्र को एक सेकिंड में एक कूलम्ब अथवा 3×10^9 *e.s.u.* आवेश पार कर जाता है।

धारा की वि० चु० इकाई (*e.m.u.*) व्यवहारिक इकाई (एम्पियर) से 10 गुना बड़ी होती है। अर्थात्

1 वि० चु० इ० (*e.m.u.*) = 10 एम्पियर

2.12. **धारामापी (Galvanometer)**—किसी परिपथ में धारा की उपस्थिति की जाँच करने और उसकी शक्ति नापनेवाला यंत्र धारामापी कहलाता है। धारा के चुम्बकीय प्रभाव के आधार पर दो प्रकार के धारामापी होते हैं—

(i) **चलचुम्बक और स्थिर कुंडल** (Moving Magnet & Fixed Coil) प्रकार के जैसे स्पर्शज्या धारा मापी (Tangent Galvanometer), कैल्विन धारा मापी आदि।

(ii) चल कुंडल और स्थिर चुम्बक (Moving Coil & Fixed Magnet) प्रकार के। जैसे डिआर्सन व्हाल धारा मापी (D' Arsonal Galvanometer) आदि।

2.13. **स्पर्शज्या धारा मापी (Tangent Galvanometer)**—यह धारा के चुम्बकीय प्रभाव पर आश्रित और स्पर्शज्या नियम (Tangent Law) पर आधारित चलचुम्बक व स्थिर कुंडल प्रकार का धारामापी है [चित्र 18]।

रचना—इसके मुख्य भाग निम्न लिखित हैं—

(i) लकड़ी या पीतल के अचुम्बकीय ढाँचे पर लिपटा हुआ प्रथक्कृत ताँबे के तार का ऊर्ध्व कुंडल होता है। इसमें प्राय: 500 चक्कर होते हैं और 0, 2, 50, 500 चक्करों के संगत क्षैतिज आधार पर चार पेंच लगे रहते हैं। यह कुंडल एक ऊर्ध्व अक्ष के परित: (about) घूम सकता है।

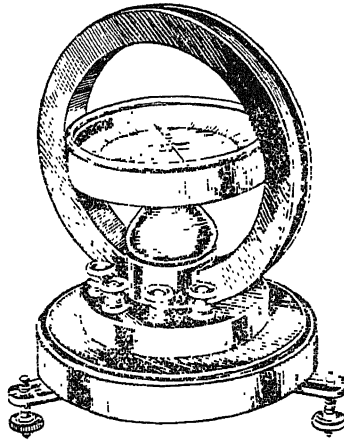
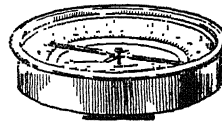
चित्र 18

(ii) क्षैतिज आधार के नीचे तीन समतल पेंच (Levelling Screws) लगे रहते हैं।

(iii) कुंडल के केन्द्र पर एक कम्पास बाक्स (Compass Box) लगा रहता है। (चित्र 19)। यह विक्षेप चुम्बकत्व मापी के बाक्स के अनुरूप होता है। एक अचुम्बकीय गोल डिब्बे के केन्द्र पर एक छोटी चुम्बकीय सुई ऊर्ध्व चूल पर सधी है। सुई के समकोणिक अल्यूमीनियम का लम्बा निर्देशक लगा है, जो सुई के साथ घूम कर क्षैतिज वृत्ताकार पैमाने पर विक्षेप पढ़ता है। पैमाने की परिधि 0° से 90° तक अंशांकित चार चतुर्थांशों में विभाजित है। सुई के नीचे एक समतल दर्पण लगा है, ताकि पढ़ने में विस्थापनाभास (Parallex) की त्रुटि न हो। डिब्बे के ऊपर शीशा लगा है ताकि सुई बाहरी वायु के झोंकों से सुरक्षित रहे।

चित्र 19

समंजन (Adjustment)—

(i) दो पेंचों के समानान्तर स्प्रिट लैविल रखो और उन्हीं दोनों पेंचों को चला कर बुलबुला बीच में ले आइये। अब पहली स्थिति के समकोणिक रख कर केवल तीसरे

पेंच की सहायता से समतल कीजिये (बुलबुला केन्द्र पर)। इससे आधार क्षैतिज हो गया और कुंडल ऊर्ध्व।

(ii) कुंडल को ऊर्ध्व अक्ष के गिर्द घुमाइये ताकि उसका तल चुम्बकीय याम्योत्तर में आ जाय। उस समय चुम्बकीय सुई, उसके विम्ब का ऊर्ध्व तल ढाँचे के तल के समानान्तर होता है। सुई कुंडल के तल ही में रहती है।

(iii) कम्पास बॉक्स को घुमा कर $0°-0°$ रेखा को निर्देशक के समानान्तर कर दीजिये और स्प्रिट लैविल की सहायता से क्षैतिज कर दीजिये। जब निर्देशक का एक सिरा $0°$ पर हो और दूसरा शून्य पर न आये तो निर्देशक को $0°-0°$ के समानान्तर कर देना चाहिये।

(iv) ऊर्ध्व कुंडल को ठीक चुम्बकीय याम्योत्तर में लाने के लिये कुंडल में धारा एक बार एक दिशा में फिर दूसरी दिशा में बहा कर विक्षेप देखते हैं। यदि दोनों ओर विक्षेप बराबर न हों, तो दोनों विक्षेपों के अन्तर के आधे के बराबर उस दिशा में घुमा दीजिये जिधर विक्षेप कम है।

सूत्र की स्थापना—मान लीजिये,

कुंडल का अर्द्धव्यास $= r$ सें० मी०

कुंडल में चक्करों की संख्या $= n$

विद्युत् धारा की शक्ति $= i$ एम्पियर

कुंडल के केन्द्र पर तीव्रता $F = \frac{2\pi ni}{10r}$ औरस्टेड

$\therefore$ i एम्पियर $= \frac{1}{10}\, i$ वि० चु० इ०

यह क्षेत्र F कुंडल के तल के समकोणिक दिशा में कार्य करता है। परन्तु पृथ्वी की क्षैतिज तीव्रता H चुम्बकीय याम्योत्तर में कुंडल के समानान्तर कार्य करती है। इस प्रकार चुम्बकीय सुई पर दो सम और अभिलम्ब क्षेत्र एक साथ कार्य कर रहे हैं। अतः यदि सुई का विक्षेप θ है तो स्पर्शज्या नियमानुसार,

$$F = H \tan\theta$$

$$\therefore \quad \frac{2\pi ni}{10r} = H \tan\theta$$

$$\therefore \quad i = \frac{10rH}{2\pi n} \tan\theta$$

$$= \frac{10H}{G} \tan\theta$$

या, $i = 10K \tan\theta$ एम्पियर .... (i)

यहाँ $G=\frac{2\pi n}{r}$ धारामापी का स्थिरांक है। और K धारामापी परिवर्तन गुणांक (Reduction Factor) कहलाता है, क्योंकि यह विक्षेप कोण के स्पर्शज्या ($\tan\theta$) को गुणा करके सीधे धारा की वि० चु० इ० में परिवर्तित कर देता है।

जब $\theta=45^\circ$, $\tan\theta=1$.

$i=10K$ एम्पियर$=K$ वि० चु० इ०

अत: धारामापी का परिवर्तन गुणक 45° का विक्षेप उत्पन्न करनेवाली वि० चु० इ० में धारा की शक्ति के बराबर होता है।

स्पर्शज्या धारामापी की सुग्राहकता (Sensitivity)—दी हुई धारा की शक्ति (i) के लिये जितना ही अधिक विक्षेप (θ) होगा उतना ही अधिक सुग्राहक धारामापी कहा जायेगा। अत: धारामापी की सुग्राहकता का (θ/i) से अनुमान लगाया जा सकता है। परन्तु थोड़े विक्षेप के लिये,

$$\theta=\tan\theta.$$

$\therefore$ धारामापी की सुग्राहकता की माप $\frac{\theta}{i}=\frac{\tan\theta}{i}=\frac{1}{10K}$.

$$=\frac{2\pi n i}{10rH} \text{ हुई}$$

अर्थात् परिवर्तन गुणक छोटा होने से सुग्राहकता बढ़ती है। इसीलिये सुग्राहकता बढ़ाने के लिये—

(i) चक्करों की संख्या n बढ़ानी चाहिये।

(ii) कुंडल का अर्द्धव्यास r घटाना चाहिये।

(iii) प्रत्यावस्थान क्षेत्र H घटाना चाहिये।

(i) एक सीमा तक कुंडल में तार के चक्करों की संख्या बढ़ाने से सुग्राहकता बढ़ेगी। परन्तु n भी अपरिमित रूप में नहीं बढ़ाया जा सकता। पहले तो n बढ़ाने से r बढ़ता है और अनिश्चित भी हो जाता है। दूसरे, धारामापी का प्रतिरोध भी बढ़ जाता है। जिस अनुपात में n बढ़ता है उसी अनुपात में प्रतिरोध भी बढ़ता है। अत: जब अधिक चक्करों का यंत्र बनाना होता है, तो ऐसा तार लेते हैं जिसकी मोटाई लम्बाई के साथ बढ़ती है। अत: अन्दर के चक्कर पतले तार के और बाहर वाले मोटे तार के बनते हैं। तार की मोटाई के विलोम अनुपात में प्रतिरोध होता है। इसलिये प्रतिरोध उतनी शीघ्रता से नहीं बढ़ पाता जितनी शीघ्रता से n बढ़ता है। ऐसे तार को ग्रेडेड तार (Graded wire) कहते हैं।

(ii) r घटाने से सुग्राहकता बढ़ती है। परन्तु r को भी अधिक नहीं घटाया जा सकता। केन्द्र पर जितने क्षेत्रफल में क्षेत्र सम होता है उसका मान r^2 का

समानुपाती होता है। अतः r को यदि अधिक छोटा कर दें तो सुई पर कार्य करनेवाला विक्षेपक क्षेत्र (deflecting field) सम नहीं रहेगा। अतः स्पर्शज्या नियम नहीं लग सकता और धारा मापी ही स्पर्शज्या धारामापी नहीं रह जायेगा।

(iii) प्रत्यावस्थान क्षेत्र H के कम होने से अधिक विक्षेप प्राप्त हो सकता है और सुग्राहकता बढ़ेगी। H के मान को नियंत्रित करने के लिये उसके ऊपर उत्तर दक्षिण दिशा में एक अतिरिक्त नियंत्रक (Controlling) चुम्बक लगाया जा सकता है। इसको ऊपर नीचे करके परिणामित प्रत्यावस्थान क्षेत्र $(F \pm H)$ को इच्छानुसार रखा जा सकता है। यहाँ F नियंत्रक चुम्बक धारामापी की सुई पर क्षेत्र है। F की दिशा H के अनुकूल या प्रतिकूल की जा सकती है।

इस सिद्धान्त का लाभ कैल्विन धारा मापी में किया गया है।

2.14. **ज्या धारामापी (Sine Galvanometer)**—स्पर्शज्या धारामापी ही ज्या धारामापी की तरह प्रयुक्त होता है। उस समय उसके आधार पर लगे क्षैतिज वृत्ताकार पैमाने का प्रयोग होता है। चुम्बकीय याम्योत्तर में लाने के बाद धारा मापी में धारा बहाई जाती है। और कुंडल को इतना घुमाते हैं कि वह पुनः सुई को अपने तल में ले लेता है। कुंडल का यह परिभ्रमण कोण कहिये θ है।

संतुलन स्थिति में $2l$ सें० मी० और m ध्रुव प्रबलता की सुई पर दो बलयुग्म कार्य कर रहे हैं (चित्र 20)। कुंडल की धारा का क्षेत्र F के कारण mF सुई के अभिलम्ब और पृथ्वी की क्षैतिज तीव्रता H के कारण mH चुम्बकीय याम्योत्तर में अर्थात् चुम्बक से θ पर।

चित्र 20

अब विक्षेपक (deflecting) बलयुग्म

$$= mF \times 2l.$$

और नियंत्रक (Controlling) बलयुग्म

$$= mH \times SP.$$

$$= mH \times 2l \sin \theta.$$

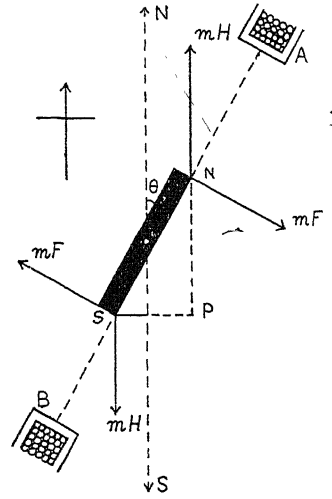
संतुलन में $mF \times 2l = mH \times 2l \sin \theta.$

या, $F = H \sin \theta.$

या, $$\frac{2\pi ni}{10r} = H \sin \theta.$$

$$\therefore \quad i = \frac{10rH}{2\pi n} \sin \theta.$$

$$i = 10K \sin \theta \text{ एम्पियर}$$

स्पष्ट है ज्या और स्पर्शज्या दोनों धारामापियों का परिवर्तन गुणक बराबर है।

परन्तु धारामापी जब ज्या धारामापी की तरह प्रयुक्त होता है, तो धारा सुई के विक्षेप के नहीं वरन् कुंडल के परिभ्रमण कोण के ज्या (Sin) के समानुपाती होती है।

ज्या और स्पर्शज्या धारामापियों की तुलना—

(i) 0 से 90° तक जाने में स्पर्शज्या θ का मान 0 से ∞ तक बदलता है, परन्तु ज्या θ का मान 0 से 1 तक। अतः यदि θ_1 और θ_2 क्रमशः ज्या और स्पर्शज्या प्रकार के लिये एक ही धारा i के संगत विक्षेप हैं, तो

$$i = 10K \sin\,\theta_1,\ i = 10K \tan\,\theta_2$$

$$\therefore\quad \sin\,\theta_1 = \tan\,\theta_2$$

स्पष्टतया : $\theta_1 > \theta_2$। अतः ज्या धारामापी स्पर्शज्या धारामापी से अधिक सुग्राहक है, क्योंकि उसमें एक ही धारा के लिये स्पर्शज्या की अपेक्षा अधिक विक्षेप आता है। जब स्पर्शज्या धारामापी में केवल 45° का विक्षेप होता है, तो उसके संगत ज्या धारामापी में 90° का विक्षेप आता है।

(ii) परन्तु ज्या धारामापी से अधिकतम धारा

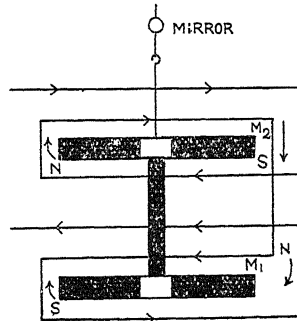
$$i = 10\ K \sin 90$$
$$= 10\ K \text{ एम्पियर}$$

तक ही नाप सकते हैं। और स्पर्शज्या धारामापी बड़ी-से-बड़ी धारा के लिये भी प्रयुक्त हो सकता है। ($\because$ स्पर्शज्या 90° = अनन्त)।

अतः निर्बल धाराओं में ज्या धारामापी ही काम में लाना चाहिये क्योंकि वह अधिक सुग्राहक होता है। और $10K$ एम्पियर से ऊँची धाराएँ तो केवल स्पर्शज्या धारामापी से ही नापी जा सकती है, ज्या धारामापी से नहीं।

2.15. **अनासक्त युग्म (Astatic Pair)**—लगभग समान चुम्बकीय घूर्णों की दो सुइयों को परस्पर समान्तर (ऊपर-नीचे) इस प्रकार लगाने से बनता है कि उनके विपरीत ध्रुव एक ओर रहें (चित्र21)। दोनों के बीच एक छोटी सी पीतल की छड़ लम्बवत् लगा कर जड़ देते हैं। युग्म को रेशम या क्वार्ट्ज़ के डोरे से लटका देते हैं जिसमें एक दर्पण लगा रहता है। एक ही तार से बना एक-एक कुंडल दोनों सुइयों के गिर्द ऐसे लपेटते हैं कि यदि ऊपर की सुइयों के गिर्द धारा की दिशा दक्षिणावर्त है, तो

चित्र 21

नीचे वाली सुई के गिर्द वामावर्त हो (चित्र 21)। एम्पियर के नियम से दोनों सुइयों पर विक्षेपक क्षेत्र की दिशा ज्ञात कीजिये। ऊपर वाली सुई पर उसके ऊपर और नीचे

दोनों ओर धारा की दिशा विपरीत है, अतः दोनों ओर की धाराओं के प्रभाव मिल कर सुई के N ध्रुव को कागज़ के तल से अन्दर की ओर तथा S ध्रुव को बाहर विक्षेपित करेंगे। नीचे वाली सुई पर लगे बलयुग्म के कारण N ध्रुव बाहर और S ध्रुव अन्दर गतिमान होगा (चित्र 21)। परन्तु ऊपर का S ध्रुव निचले N ध्रुव की ओर है। अतः सब धाराओं का सम्मिलित प्रभाव यही है कि ऊपर से देखने पर कुल समुदाय दक्षिणावृत घूमेगा।

इस प्रकार विक्षेपक क्षेत्र F के लिये प्रभावित चुम्बकीय घूर्ण (M_1+M_2) हुआ यदि M_1 और M_2 उनके अलग-अलग घूर्ण हैं।

परन्तु पृथ्वी की क्षैतिज तीव्रता H के लिये प्रभावित घूर्ण (M_1-M_2) होगा, क्योंकि दोनों सुइयों के विपरीत ध्रुव एक ओर हैं। अतः यदि सन्तुलन स्थिति में विक्षेप θ है तो, विक्षेपक घूर्ण=प्रत्यावस्थान घूर्ण ; परन्तु

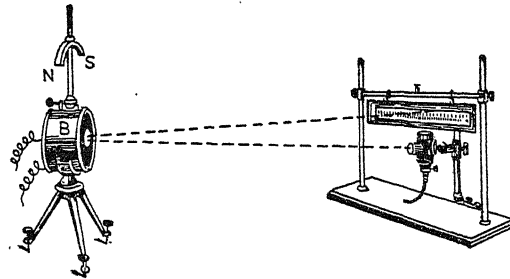
$$\text{विक्षेपक घूर्ण} = (M_1+M_2)\ F \cos\theta.$$

$$\text{और प्रत्यावस्थान घूर्ण} = (M_1-M_2)\ H \sin\theta.$$

$$\therefore\quad (M_1+M_2)\ F\cos\theta = (M_1-M_2)\ H\sin\theta.$$

$$\text{अथवा,}\ F = \frac{M_1-M_2}{(M_1+M_2)}\ H\tan\theta.$$

क्योंकि M_1 और M_2 लगभग बराबर है, अतः $\frac{(M_1-M_2)}{(M_1+M_2)}$ बहुत छोटी संख्या होगी। इसलिये दी हुई धारा शक्ति के लिये अधिक विक्षेप आयेगा। इस प्रकार धारामापी की सुग्राहकता अत्यधिक बढ़ाई जा सकती है।

2.16 **कैल्विन का दर्पण धारामापी (Kelvin's Mirror Galvanometer)**—रेशम के डोरे से लटके हुए एक छोटे से दर्पण के पीछे एक छोटा-सा चुम्बक

चित्र 22

चिपका रहता है। दर्पण एक वृत्ताकार कुंडल के केन्द्र पर रहता है। प्रभावित प्रत्यावस्थान क्षेत्र के नियन्त्रण के लिये ऊपर एक चुम्बक NS लगा है जिसका N ध्रुव उत्तर

की ओर है। अतः नियन्त्रक चुम्वक का क्षेत्र पृथ्वी के H के विपरीत होगा। नियन्त्रक चुम्वक को ऊपर-नीचे करके प्रत्यावस्थान क्षेत्र नियन्त्रित किया जा सकता है जिससे धारा मापी की सुग्राहता बढ़ाई या घटाई जा सकती है। जब कुंडल में धारा बहती है, तो चुम्वक के साथ दर्पण भी घूमता है।

इस दर्पण पर एक छोटे से लैम्प का प्रकाश एक झिर्री (Slit) अथवा स्वस्तिका चिह्न (Cross) में हो कर पड़ता है। एक उन्नतोदर ताल की सहायता से स्वस्तिका का स्पष्ट विम्ब दर्पण से परावर्तन के बाद एक अल्प पारदर्शक (Transluscent) पैमाने पर वनाते हैं। धारा बहने से दर्पण घूमता है और पैमाने पर विम्ब चलता है।

मान लीजिये पैमाने पर विम्ब का स्थानान्तरण d सें० मी० है और पैमाने की दर्पण से दूरी D सें० मी० है। यदि दर्पण या चुम्बक का परिभ्रमण कोण θ है, तो परावर्तित किरण अथवा विम्ब 2θ कोण से घूमेगी। अतः $2\theta = d/D$

पैमाने की दूरी बढ़ा कर छोटे कोण भी नापे जा सकते हैं। प्रायः $D = 100$ सें० मी० रखा जाता है और $d = 1$ मि० मी० सरलता से देखा जा सकता है। इस प्रकार,

$$\theta = \frac{1}{2}\frac{d}{D} = \frac{\cdot 1}{200}$$

$$= \cdot 0005 \text{ रेडियन}$$

तक का विक्षेप सरलता से नापा जा सकता है।

1 मी० दूर पैमाने पर 1 मि० मी० का विक्षेप उत्पन्न करनेवाली कुंडल की धारा उपकरण के संवेदन अंक (figure of merit) के बराबर होती है। कैल्विन के दर्पण धारामापी के लिये संवेदन अंक 10^{-6} एम्पियर से 10^{-9} एम्पियर तक होता है।

2.17. धारा 2·10 के लैप्लेस के नियम के अनुसार i वि० चु० इ० की धारा ले जानेवाले l सें० मी० लम्बे चालक के कारण r सें० मी० दूर एक बिन्दु P पर चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता,

$$I = \frac{i\,l \sin\,\theta}{r^2} \text{ औरस्टेड}$$

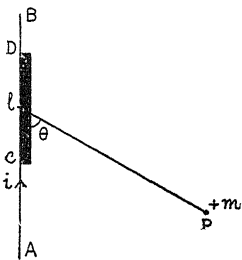
होती है। यहाँ θ कोण i और r के बीच बनता है। इस क्षेत्र की दिशा i और r के तल से अभिलम्ब होती है।

P पर स्थित m इकाई उत्तरी ध्रुव पर कार्य करने वाला बल

$$F = m\frac{i\,l\,\sin\,\theta}{r^2} \text{ डाइन}$$

होगा। परन्तु न्यूटन के तृतीय नियम के अनुसार इतना ही बल धारा अवयव पर कार्य करेगा। इसका मान भी

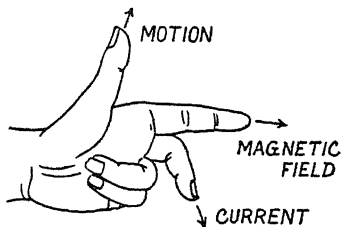
$$F = i\,l\,\sin\,\theta \times \frac{m}{r^2} = i\,lH \sin\,\theta \text{ होगा।}$$

यहाँ $H=\frac{m}{r^2}$ P पर स्थित m ध्रुव की i पर तीव्रता है और $\theta=$ क्षेत्र H और i के बीच का कोण (चित्र 23)। इस बल की दिशा H और i के तल के अभिलम्ब होगी। चित्र (23) में बल की दिशा काग़ज़ के तल से बाहर की ओर होगी।

चित्र 23

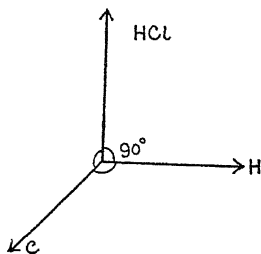
यदि $\theta=90^\circ$ तो $\sin\theta=1$ और बल का मान $F=ilH$ डाइन होगा।

यदि धारा एम्पियर में नापी जाय और उसका मान C एम्पियर हो, तो धारा पर कार्य करनेवाला बल $=\frac{HCl}{10}$ डाइन होगा।

यदि धारा शक्ति C वि० चु० इ० है, तो बल $=$ $HCl/10$ डाइन ही होगा।

इस व्यंजक को आप बड़ी सुगमता से याद रख सकते हैं क्योंकि HCl नमक के अम्ल का सूत्र है।

चित्र 24

फ्लैमिंग का बाँयें हाथ का नियम—जब $\theta=90^\circ$ हो, तो धारा अवयव पर कार्य करनेवाले बल की दिशा इस नियम से बड़े सुन्दर और स्पष्ट प्रकार से ज्ञात हो सकती है।

"अपने बायें हाथ की तर्जनी, मध्य उँगली और अँगूठा इस प्रकार फैलाइये कि वे परस्पर समकोण बनावें। अब यदि तर्जनी (Fore finger) चुम्बकीय क्षेत्र (Field) की दिशा बताती है और मध्य की उंगली (Central finger) धारा (Current) की तो अँगूठा (Thumb) उस दिशा को बतायेगा जिसमें धारा ले जानेवाला चालक गति (Motion) करेगा।"

चित्र 25

कोष्ठों में लिखे अंग्रेजी के संगत शब्दों के बड़े (capital) अक्षरों (letters) पर ध्यान देने से यह नियम बड़ी सरलता से याद किया जा सकता है।

क्षेत्र (H), धारा (C) और परिणामित बल (HCl) की पारस्परिक आपेक्षिक दिशायें चित्र 25 से बिल्कुल स्पष्ट हो जायेंगी।

2.18. **चुम्बकीय क्षेत्र में आयाताकार कुंडल की धारा पर बल**—चित्र 26 में $ABCD$ एक आयताकार कुंडल है जिसकी लम्बाई $AB=CD=a$ सें० मी० चौड़ाई $BC=DA=b$ सें० मी० है। कुंडल का तल H ओरस्टेड के क्षेत्र से α कोण बनाता है। अतः कुंडल की चौड़ाई का विश्लिष्ट भाग क्षेत्र की दिशा में

$$=CC'=BC\cos\alpha.$$
$$=b\cos\alpha \text{ (चित्र 27 (ii))}$$

और क्षेत्र के अभिलम्ब$=b\sin\alpha$ हुआ।

चित्र 26

फ्लैमिंग के नियम से दिशा और $F=HCl\sin\theta$ सूत्र से परिमाण कुंडल के चारों भुजाओं के बलों के लिये निकालेंगे (यहाँ $\theta=H$ और C के बीच कोण है)—

भुजा AB पर बल ; $(\theta=90^\circ)$

$F_{AB}=HC\,a$ डाइन बाहर की ओर, भुजा CD पर बल $(\theta=90^\circ)$,

$F_{CD}=HC\,a$ डाइन अन्दर की ओर, भुजा BC पर बल $(\theta=\alpha)$ चित्र 27 (ii)

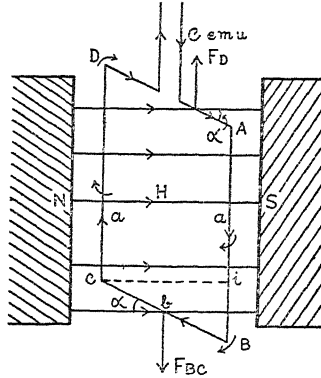
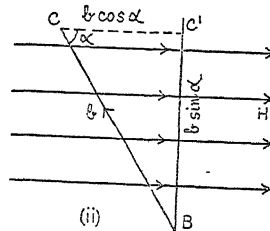
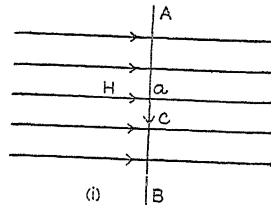
$F_{BC}=HC\,b\sin\alpha$ कुंडल के तल में नीचे की ओर और भुजा DA पर बल $(\theta=\alpha)$

$F_{AD}=HC\,b\sin\alpha$ कुंडल के तल में ऊपर की ओर। स्पष्ट है कि BC और DA पर कार्य करने वाले बल एक ही तल (कुंडल का तल) में स्थित है तथा परस्पर विपरीत परन्तु बराबर हैं। साथ ही उनकी क्रिया रेखाओं के बीच की दूरी शून्य है। अतः वे एक दूसरे का शून्यन कर देंगे। उनका संयुक्त प्रभाव शून्य होगा।

चित्र 27

F_{AB} और F_{CD} परस्पर विपरीत और बराबर हैं, परन्तु उनकी क्रिया रेखाओं के बीच की दूरी $CC'=b\cos\alpha$ के बराबर है। अतः ये दोनों मिल कर एक बलयुग्म बनाती हैं जिसका घूर्ण=बल×क्रिया रेखाओं के बीच अभिलम्ब दूरी

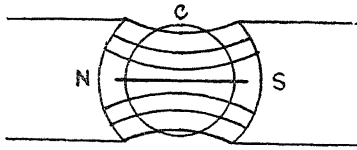
$$=HC\,a\times b\cos\alpha.$$
$$=HC\times(a.\,b)\cos\alpha.$$

अर्थात् घूर्ण $T=HC\,A\cos\alpha.$

यहाँ $A=a\,b$ कुंडल का क्षेत्रफल है।

यह घूर्ण $T=HC\,A$ जब $\alpha=0^\circ$ और $T=0$ जब $\alpha=90^\circ$.

अतः धारा प्रवाह से कुंडल सदैव क्षेत्र के समकोणिक स्थिर होने की प्रवृत्ति रखता है। उस स्थिति में कुंडल से गुज़रनेवाली बल रेखाओं की संख्या अधिकतम होती है। समकोणिक स्थिति में परिभ्रमण घूर्ण T शून्य होता है और कुंडल स्थिर रहता है। परन्तु विक्षेपक घूर्ण अधिकतम उस समय होता है, जब कि कुंडल क्षेत्र के समानान्तर ($\alpha=0$) होता है।

M चुम्बकीय घूर्णवाला चुम्बक जब H तीव्रतावाले क्षेत्र से θ कोण बनाता है, तो उस पर प्रत्यवस्थान घूर्ण $=MH\,\text{Sin}\,\theta$ होता है। इस सूत्र की तुलना कुंडल पर कार्य करनेवाले घूर्ण $(AC)\;H\;\text{Cos}\;\alpha$ से करने पर स्पष्ट है कि कुंडल एक चुम्बकीय कवच (Shell) की भाँति कार्य करता है। कवच का चुम्बकीय घूर्ण धारा और क्षेत्रफल के गुणनफल (CA) के बराबर है और उसकी दिशा कुंडल के अभिलम्ब है।

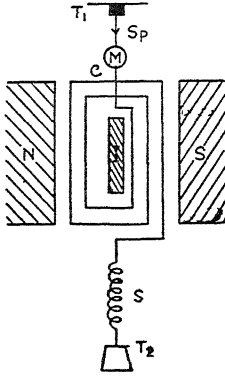
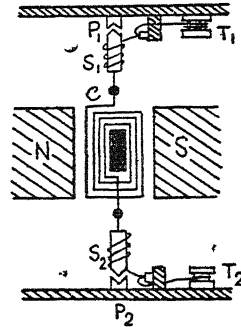
त्रिज्यीय क्षेत्र (Radial Field)—आपने देखा कि जैसे-जैसे कुंडल का झुकाव क्षेत्र की अपेक्षा बदलता है विक्षेप घूर्ण भी बदलता है। घूर्ण का अधिकतम मान उस समय होता है जब कुंडल का तल बल रेखाओं के समान्तर ($\alpha=0$) होता है। उस समय घूर्ण $T=CAH\,\text{Cos}\,0^\circ=CAH$ होता है।

चित्र 28

अब चित्र 28 पर ध्यान दीजिये। N और S एक नाल चुम्बक के खोखले बेलनाकार (hollow cylindrical) ध्रुव हैं। इनके बीच C एक कच्चे लोहे का बेलन ध्रुवों के समकेन्द्रिक स्थित है। ध्रुवों के बीच बल रेखाओं की दिशा C के अर्द्धव्यासों के लगभग समान्तर हो जाती है। ऐसे क्षेत्र को त्रिज्यीय (Radial) क्षेत्र कहते हैं।

बिन्दुदार रेखाओं से AB कुंडल दिखाया गया है, जो C के गिर्द घूम सकता है। उसकी परिभ्रमण अक्ष और C बेलन की अक्ष एक ही ऋजु रेखा में है। अतः कुंडल की समस्त स्थितियों में क्षेत्र की बल रेखायें कुंडल के तल के ही समान्तर होंगी। उस समय α सदैव शून्य होगा और विक्षेपक घूर्ण सदैव

$T=CAH$ डाइन सें० मी० ही रहेगा।

2.19. **चल कुंडल धारा मापी (Moving coil Galvanometer)**—त्रिज्यीय क्षेत्र में कुंडल पर विक्षेपक घूर्ण के सिद्धान्त पर ही चल कुंडल धारामापी बनाये गये हैं। ये धारामापी दो प्रकार के होते हैं—

(i) **लटके कुंडल** (Suspended Coil) प्रकार के (चित्र 29) और
(ii) **चूल पर संतुलित कुंडल** (Pivoted coil) प्रकार के (चित्र 30)

चित्र 29

चित्र 30

रचना—इनमें (चित्र 29, 30)

NS=नाल चुम्बक के ध्रुव

C =n चक्करों का कुंडल

I =केन्द्रीय कच्चे लोहे की क्रोड़ (Core)

S, S_1, S_2=फ़ोसफ़र ब्रोंज (Phosphor Bronze) की कमानी (Springs)

T_1, T_2=धारा वहाने के लिये पेंच (Terminals) चित्र 29 में

कुंडल एक फ़ोसफ़र ब्रोंज की Sp पतली पत्ती (Strip) से लटका रहता है। धारा T_1 से इसी पत्ती के रास्ते कुंडल में बहती है। और कमानी S से होकर T_2 से बाहर जाती है। पतली पत्ती Sp में एक छोटा दर्पण लगा है। जिसकी सहायता से लैम्प और पैमाने (Lamp & Scale) के प्रबन्ध से विक्षेप नापा जा सकता है।

चित्र 30 में—

कुंडल P_1 और P_2 चूलों पर सधा है। धारा T_1 से कमानी S_1 के रास्ते कुंडल में जाती है और S_2 के मार्ग से T_2 पर बाहर निकलती है। विक्षेप नापने के लिये एक निर्देशक (चित्र में नहीं दिखाया) लगा रहता है जो वृत्ताकार पैमाने पर घूमता है।

सूत्र (Formula) निकालना—जब कुंडल में C एम्पियर की धारा बहती है, तो उस पर एक विक्षेपक घूर्ण $T=\frac{nCAH}{10}$ डाइन सें० मी० कार्य करेगा। यहाँ n कुंडल में तार के चक्करों की संख्या है। इस घूर्ण की क्रिया से कुंडल घूमना प्रारम्भ करेगा। परन्तु साथ ही फ़ोसफ़र ब्रोंज की पतली पत्ती Sp (लटका हुआ

कुंडल चित्र 29) और कमानियाँ S (चित्र 29) व S_1 S_2 (चित्र 30) में ऐंठन (Torsion) पैदा होगा। जैसे-जैसे विक्षेप वढ़ता जायेगा यह ऐंठन-घूर्ण (Torsion moment) वढ़ता जायेगा। एक स्थिति ऐसी आयेगी कि ऐंठन-घूर्ण विक्षेपक घूर्ण के बरावर होगा और कुंडल स्थिर हो जायेगा।

मान लीजिये,

पत्ती या कमानियों में इकाई विक्षेप के लिये उत्पन्न हुआ ऐंठन घूर्ण $=\mu$

और विक्षेप कोण $=\theta$.

$\therefore$ कुल ऐंठन घूर्ण $=\mu\theta$.

परन्तु विक्षेप घूर्ण $=nCAH$ सदैव

$\therefore$ सन्तुलन स्थिति में,

$$nCAH=\mu\theta.$$

$$\therefore \quad C=\frac{\mu}{nAH}\theta$$

या, $C=K\ \theta$.

यहाँ $K=\dfrac{\mu}{nAH}$ धारा मापी विशेष का परिवर्तन गुणक (Reduction Factor) है।

स्पष्ट है कि कुंडल का विक्षेप θ उसमें बहनेवाली धारा C के समानुपाती है।

उदाहरण—500 चक्करों के कुंडल में 0·5 एम्पियर की धारा बह रही है। यदि कुंडल का मध्यम व्यास 25 सें० मी० हो, तो केन्द्र पर चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता बताइये।

एक वृत्ताकार कुंडल के केन्द्र पर क्षेत्र की तीव्रता

$$F=\frac{2\pi ni}{10r} \text{ औरस्टेड}$$

होती है। यहाँ

$$n=500, \quad i=0·5 \text{ एम्पियर}$$

$$r=\frac{25}{2}=12·5 \text{ सें० मी०}$$

$$\therefore \quad F=\frac{2\pi\times500\times·5}{10\times12·5}$$

$$=4\pi \text{ औरस्टेड}$$

सारांश

धारा शक्ति की व्यवहारिक इकाई एम्पियर (Ampere) है। एक एम्पियर शक्ति की धारा में एक कूलम्ब आवेश प्रति सेकिंड की दर से बहता है।

एक विद्युत् चुम्बकीय इकाई $=10$ एम्पियर

1 सें० मी० अर्द्धव्यास के वृत्ताकार कुंडल में एक वि० चु० इ० की धारा के बहने से केन्द्र पर 2π औरस्टेड चुम्बकीय क्षेत्र उत्पन्न होता है।

स्पर्शज्या धारामापी में वहनेवाली धारा की शक्ति $i = 10K\tan\theta$ एम्पियर होती है।

K धारामापी का परिवर्तन गुणक है। इसका मान, $K = \dfrac{rH}{2\pi n}$ होता है। जहाँ

n = चक्करों की संख्या
r = कुंडल की त्रिज्या
और H = पृथ्वी की क्षैतिज तीव्रता

एक चुम्बकीय क्षेत्र में स्थित धारा ले जानेवाले चालक पर कार्य करनेवाला बल

$$F = \frac{HCl \sin\theta}{10} \text{ डाइन}$$

H = चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता (औरस्टेड)
C = एम्पियर में धारा
l = सें० मी० में चालक की लम्बाई
θ = H और C के बीच कोण

इसकी दिशा H और C के तल के अभिलम्ब होती है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. विद्युत् धारा के कारण चुम्बकीय क्षेत्र की उत्पत्ति दर्शाने के लिये एक प्रयोग बताइये। क्षेत्र की दिशा के लिये विभिन्न नियमों को समझाइये।
2. लैप्लेस के नियम की सहायता से एक वृत्ताकार कुंडल की धारा के कारण केन्द्र पर चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता निकालिये। इससे धारा की वि० चु० इकाई की परिभाषा कीजिये।
3. स्पर्शज्या धारामापी की रचना और कार्य-विधि समझाइये। उपयुक्त सूत्र की स्थापना करके धारामापी की सुग्राहकता की विवेचना कीजिये।
4. "अनासक्त युग्म" पर टिप्पणी लिखिये।
5. कैल्विन के दर्पण धारामापी की कार्य-विधि समझाइये।
6. चुम्बकीय क्षेत्र में स्थित धारा ले जानेवाले चालक पर कार्य करनेवाले बल का परिमाण और दिशा बताइये। फ्लैमिंग के नियम की व्याख्या कीजिये।
7. चुम्बकीय क्षेत्र में एक आयताकार कुंडल में बहनेवाली धारा पर परिभ्रमण घूर्ण निकालिये। इससे चल कुंडल धारामापी का वर्णन कीजिये। त्रिज्यीय क्षेत्र का क्या महत्व है? चल कुंडल धारामापकों के कितने प्रकार होते हैं?
8. एक कुंडल में 30 चक्कर हैं और त्रिज्या 6 सें० मी० है। दूसरे कुंडल में 25 फेरे हैं और त्रिज्या 15 सें० मी०। दोनों के तल परस्पर समकोणिक है, परन्तु केन्द्र एक ही बिन्दु पर हैं। यदि दोनों में 8 एम्पियर की धारा बहे तो केन्द्र पर परिणामित तीव्रता निकालिये। **(उत्तर—26 औरस्टेड)**
9. दो स्पर्शज्या धारामापियों में केवल कुंडलों के चक्कर भिन्न हैं। वे श्रेणी क्रम में जुड़े हैं। अब धारा बहाने से उनमें क्रमश: 45° और 35° के विक्षेप आते हैं। दोनों में चक्करों की संख्या का अनुपात बताइये।
   ($\tan 45 = 1$, $\tan 35^\circ = 0{\cdot}70$) **(उत्तर—10 : 7)**

10. किसी लम्बे तार में प्रवाहित होने वाली धारा बहुत क्षीण है, जिससे उसे किसी चुम्बकीय सुई के निकट लाने पर कोई विशेष विचलन नहीं प्राप्त होता। क्या व्यवस्था की जाय कि धारा प्रवाह से विचलन की मात्रा यथेष्ट हो जाय ?
11. उन प्रयोगों का विवरण दो, जिनसे (i) एक धारावाहक के कारण दूसरे धारा-वाहक पर (ii) एक चुम्बक का किसी धारावाहक पर और (iii) धारावाहक का चुम्बक पर प्रभाव लक्षित हो। इस प्रकार के आयोजनों के व्यावहारिक महत्त्व पर प्रकाश डालिए।
12. बार्लो के चक्र का वर्णन करते हुए यह समझाइए कि उसकी कार्य प्रणाली डायनमो या मोटर के सिद्धान्त को किस प्रकार लक्षित करती है। चक्र की गति किन बातों पर आधारित होती है ?
13. रोजे की कम्पनशील सर्पिल व्यवस्था (Vibrating Spiral) की क्रिया समझाइये। बल रेखाओं के आधार पर अथवा किसी अन्य सैद्धान्तिक दृष्टिकोण से उसकी किस प्रकार व्याख्या की जा सकती है ?
14. उदग्र स्थिति में व्यवस्थित किसी लम्बे तार में एक तीव्र विद्युत् धारा प्रवाहित की जाती है। निम्न साधनों अथवा उपकरणों से किस प्रकार धारा की दिशा की पहचान की जा सकती है ? (i) एक चुम्बकीय सुई, (ii) धारावाहक एक लचकीला (Flexible) तार (iii) चुम्बकीय सुई के कम्पन की गति।
15. किसी छोटी चुम्बकीय सुई को एक उदग्र चूल पर लटकाया जाता है। वह किस दशा में ठहरेगी और क्यों ?

    एक धारावाहक तार को किसी चुम्बकीय सुई के ऊपर क्षैतिज स्थिति में, (i) सुई के समानान्तर (ii) सुई के लम्बात्मक रखा जाता है। बताइये कि प्रत्येक स्थिति में क्या होगा ?

    यदि धारा की तीव्रता बढ़ा दें, अथवा उसकी दिशा उलट दें, तो क्या प्रभाव मिलेंगे ? क्यों ?
16. एक छोटा चुम्बक एक लम्बे ऊर्ध्वाधर तार के 10 सें० मी० पूर्व की ओर रखा है और केवल पृथ्वी के क्षेत्र में 24 आवृत्ति प्रति मिनट करता है। यदि इस तार में 6 एम्पियर की धारा (i) ऊपर (ii) नीचे की ओर प्रवाहित करें, तो आवृत्ति काल क्या होगा ?

    यदि चुम्बक को पश्चिम की ओर (30·98, 13·85) रख दिया जाए, तो आवृत्ति काल क्या होगा ? जब (i) धारा ऊपर की ओर जा रही हो, (ii) जब नीचे की ओर जा रही हो ?
17. स्पर्शज्या धारामापक, ज्या धारामापक और चल कुंडल धारामापियों के आपेक्षिक गुण-दोषों पर प्रकाश डालिए।
18. स्पर्शज्या धारामापक में यदि चुम्बकीय सुई केन्द्र से हटी हुई हो, तो क्या दोष उत्पन्न होगा ? धारामापक की रचना में क्या संशोधन किया जाय कि यह दोष दूर हो जाय ?
19. यदि किसी चुम्बकीय सुई को किसी वृत्तीय धारावाही कुंडल के केन्द्र से जानेवाली अक्ष पर चलाया जाय, तो विचलन पर क्या प्रभाव होगा ? (कुंडल, चुम्बकीय याम्योत्तर में रखा गया है)। इसके द्वारा उत्क्रम वर्ग नियम को किस प्रकार सत्यापित करोगे ?

अध्याय 3

ओह्म-नियम और प्रतिरोध

(Ohm's Law and Resistance)

3.1. **ओह्म का नियम**—जब किसी चालक के तार में विद्युत धारा बहती है, तो उसके दोनों सिरों के बीच एक विभवान्तर उत्पन्न हो जाता है। "चालक के दोनों सिरों के बीच विभवान्तर और बहनेवाली धारा की शक्ति का अनुपात एक भौतिक स्थिरांक के बराबर होता है ; बशर्ते कि चालक की भौतिक अवस्था न बदले।"

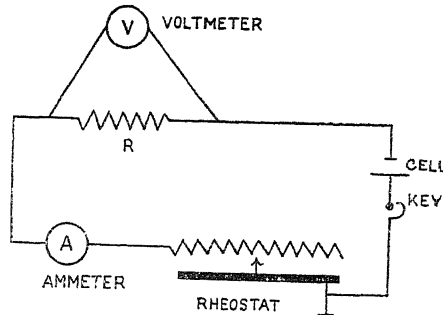
यदि I धारा के बहने से E विभवान्तर उत्पन्न होता है, तो,

$$\frac{E}{I}=R$$

या,

$$E=I\,R$$

यहाँ R एक स्थिरांक है जिसे चालक का "प्रतिरोध" (Resistance) कहते हैं। इसकी व्यवहारिक इकाई ओह्म (Ohm) है। एक ओह्म प्रतिरोध के तार में एक एम्पियर की धारा के बहने से एक वोल्ट विभवान्तर उत्पन्न होता है। प्रतिरोध (R) का मान चालक की लम्बाई, अनुप्रस्थ क्षेत्र (Cross-section area), पदार्थ (material) और ताप (temperature) पर निर्भर करता है।

नियम का सत्यापन (Verification)—विद्युत् परिपथ चित्र 31 की भाँति जोड़िये। प्रायोगिक प्रतिरोध R के समान्तर एक वोल्टमापी (V) और श्रेणीक्रम में एम्पियर मापी (A), परिवर्तनशील प्रतिरोध (Rheostat), कुंजी (key) और सेल (cell) जोड़ दीजिये।

चित्र 31

एम्पियर मापी से धारा शक्ति और वोल्टमापी (Voltmeter) से प्रतिरोध R के किनारों का विभवान्तर नाप सकते हैं। कुंजी (Key) दबा कर धारा बहने दीजिये। परिवर्तन शील प्रतिरोध की सहायता से धारा की विभिन्न शक्तियों के संगत R के सिरों का विभवान्तर पढ़ लीजिये। अपने अवलोकनों को निम्न सारिणी की भाँति अभिलेखित कर लीजिये—

क्रमाङ्क	एम्पियर मापी का पाठ (एम्पियर) I	वोल्ट मापी का पाठ (वोल्ट) E	प्रतिरोध (ओह्म) $R=E/I$	मध्यमान (ओह्म) R
1.	0·2	0·26	1·3	
2.	0·5	0·65	1·3	1·29
3.	0·7	0·90	1·28	
4.	0·9	1·16	1·29	

सारिणी से स्पष्ट है कि विभवान्तर और धारा का अनुपात E/I लगभग स्थिर रहता है। चालक का औसत प्रतिरोध 1·29 ओह्म है।

इन्हीं अवलोकनों की सहायता से एक ग्राफ खींचिये। Y–अक्ष पर विभवान्तर (E) और X–अक्ष पर धारा शक्ति (I) लीजिये।

आप देखेंगे कि ग्राफ एक ऋजु रेखा है, जो मूल बिन्दु (0, 0) से गुज़रती है। इस रेखा और X अक्ष के बीच कोण θ नापिये।

चित्र 31 (a)

$$\tan\ \theta = R$$

होना चाहिये। [समीकरण $E=RI$ और $y=mx$ की तुलना से]

$$m = \tan\ \theta = R.$$

ग्राफ से निकाला हुआ प्रतिरोध ऊपर गणना द्वारा प्राप्त हुए मान के लगभग बराबर होगा। (E, I) ग्राफ के ऋजु रेखीय होने से स्पष्ट है कि विभवान्तर E धारा I के समानुपाती है और क्योंकि ग्राफ मूल बिन्दु (0, 0) से जाता है, अतः ($E=0$, $I=0$) विभवान्तर और धारा एक साथ शून्य मान प्राप्त करती है। अर्थात् धारा की अनुपस्थिति ($I=0$) में विभवान्तर भी शून्य ($E=0$) होता है।

3.2. **विशिष्ट प्रतिरोध (Specific Resistance)**—किसी तार का प्रतिरोध R,

(i) चालक की लम्बाई 'l' के समानुपाती होता है।
(ii) अनुप्रस्थ क्षेत्र 'A' के व्युत्क्रमानुपाती होता है।
(iii) तार के पदार्थ पर निर्भर करता है।
(iv) ताप बदलने पर प्रतिरोध भी बदल जाता है।

अतः निश्चित् ताप (temperature) पर दिये हुए पदार्थ (material) के तार का प्रतिरोध,

$$R \propto l$$

$$\propto \frac{1}{A}$$

या $$R \propto \frac{l}{A}$$

$$\therefore\ R = S\frac{l}{A}$$

समानुपाती स्थिरांक S का मान तार के पदार्थ और ताप पर निर्भर करता है। इसको पदार्थ का विशिष्ट प्रतिरोध (Specific Resistance) कहते हैं।

यदि $l=1$, $A=1$ हो, तो

$R=S$ होता है।

अर्थात्, विशिष्ट प्रतिरोध पदार्थ के बने उस टुकड़े के प्रतिरोध के बराबर होता है जिसकी लम्बाई 1 सें० मी० और अनुप्रस्थ क्षेत्र 1 वर्ग सें० मी० हो। एक सें० मी० घन के आमने-सामने के धरातलों के बीच का प्रतिरोध भी उसके विशिष्ट प्रतिरोध के बराबर होता है।

इकाई $R=S\ l/A$

में सब राशियों की इकाइयाँ रखिये।

$$\text{ओह्म} = S\frac{\text{सें० मी०}}{(\text{सें० मी०})^2}$$

$$\therefore\quad S = \text{ओह्म} \times \text{सें० मी०}$$

प्रायः धातुओं के वि० प्र० बहुत कम होते हैं। अतः उनको व्यक्त करने के लिये प्रतिरोध की एक छोटी इकाई माइक्रो-ओह्म ली जाती है।

1 माइक्रो ओह्म $=10^{-6}\times$ओह्म।

प्रयोगों द्वारा पता चला है कि 14·4521 ग्राम संहति वाले 106·3 सें० मी० लम्बे पारे के डोरे का प्रतिरोध $0^\circ C$ पर 1 ओह्म होता है।

बड़े-बड़े प्रतिरोधों को मेगओह्म (Megohm) $=10^6$ ओह्म में व्यक्त करते हैं।

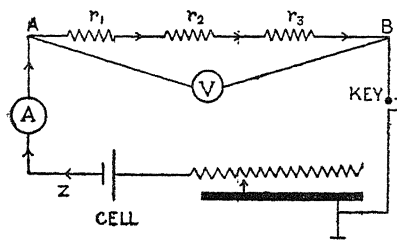
विद्युत् चालकता (Electric Conductivity)—विशिष्ट प्रतिरोध का विलोम धातु विशेष की विशिष्ट चालकता (Specific conductivity) कहलाती है।

वि० चालकता$=1/S$ म्हो (Mho) वि० चालकता की इकाई *OHM* के अक्षरों को उलटने से *MHO* बनती है।

R प्रतिरोध वाले तार की चालकता $1/R$ Mho होती है।

3.3. **समतुल्य प्रतिरोध (Equivalent Resistance)**—एक अकेला प्रतिरोध R दो या अधिक प्रतिरोधों के समुदाय के समतुल्य उस समय कहा जाता है जब कि किसी परिपथ के दो विन्दुओं के बीच R या समुदाय किसी को भी जोड़ देने से परिपथ की धारा और दोनों विन्दुओं का विभवान्तर का मान समान रहता है।

एक से अधिक प्रतिरोधों को जोड़ कर दो प्रकार से समुदाय वनाया जाता है—

(i) **श्रेणीक्रम (Series)**—चित्र 32 में r_1, r_2, r_3 प्रतिरोध इस प्रकार जुड़े हैं कि r_1 का एक सिरा r_2 के पहले सिरे से, r_2 का दूसरा सिरा r_3 के पहले सिरे से जुड़ा है। r_1 का पहला सिरा और r_3 का दूसरा सिरा A और B के बीच जोड़ दिये गये हैं। चित्र की भाँति परिपथ जोड़ने से तीनों प्रतिरोधों में से एक ही शक्ति की धारा i बहेगी। A और B का विभवान्तर E वोल्ट मापी की सहायता से पढ़िये।

चित्र 32

मान लीजिये, r_1, r_2, r_3 के सिरों के बीच विभवान्तर क्रमशः e_1, e_2, e_3 है। तो ओह्म के नियम से : विभवान्तर=धारा×प्रतिरोध

$$\therefore \quad e_1 = ir_1, \; e_2 = ir_2, \; e_3 = ir_3$$

परन्तु, A और B का विभवान्तर,

$$\begin{aligned} E &= e_1 + e_2 + e_3 \\ &= ir_1 + ir_2 + ir_3 \\ &= i\;(r_1 + r_2 + r_3) \end{aligned}$$

$$\therefore \quad E/i = r_1 + r_2 + r_3$$

यदि इस समुदाय के समतुल्य प्रतिरोध R है तो R को A और B के बीच जोड़ने से i धारा बहेगी और विभवान्तर भी E होगा। तब ओह्म नियम से,

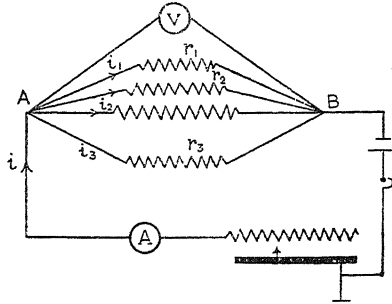
$R = E/i$ होगा।

$$\therefore \quad R = r_1 + r_2 + r_3$$

श्रेणीबद्ध प्रतिरोधों का योग समतुल्य प्रतिरोध के बराबर होता है।

सत्यापन (Verification)—चित्र 32 की भाँति परिपथ जोड़ कर ओह्म-नियम की सहायता से r_1, r_2, r_3 को बारी-बारी से A और B के बीच जोड़ कर उनके प्रतिरोध ज्ञात कर लीजिये। अब उनको श्रेणी क्रम में जोड़ कर समुदाय को A और B के बीच जोड़ कर उसका प्रतिरोध भी ओह्म नियम की सहायता से निकालिये। आप

देखेंगे कि इस प्रकार प्रयोग से निकाला गया समुदाय का प्रतिरोध तीनों के प्रतिरोधों के योग के बराबर है।

(ii) **समान्तर क्रम (Parallels)**—समान्तर क्रम में सब प्रतिरोधों का एक सिरा एक बिन्दु पर और सब का दूसरा सिरा दूसरे विन्दु पर जोड़ देते हैं। चित्र 33 में r_1, r_2, r_3 A और B विन्दुओं के बीच समानान्तर क्रम में जुड़े हैं। परिपथ जोड़ कर धारा i बहाने से तीनों प्रतिरोधों में धारा की शक्ति क्रमशः i_1, i_2, i_3 होगी। परन्तु क्योंकि सब A और B के बीच जुड़े हैं, अतः सब के लिये विभवान्तर E समान होगा (वोल्ट-मापी V का पाठ)।

चित्र 33

ओह्म के नियम से प्रत्येक प्रतिरोध के लिये

$$\text{धारा} = \frac{\text{विभवान्तर}}{\text{प्रतिरोध}}$$

$$\therefore \quad i_1 = \frac{E}{r_1}, \quad i_2 = \frac{E}{r_2}, \quad i_3 = \frac{E}{r_2}.$$

परन्तु i_1, i_2, i_3 का योग परिपथ की कुल धारा के बराबर है।

$$\therefore \quad i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$= \frac{E}{r_1} + \frac{E}{r_2} + \frac{E}{r_3}$$

$$= E\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}\right).$$

$$\therefore \quad \frac{i}{E} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}.$$

यदि R प्रतिरोध समतुल्य है, तो इसको A और B के बीच जोड़ने से विभवान्तर E और परिपथ की कुल धारा i होगी। उस समय ओह्म नियम से—

$$R = \frac{E}{i}$$

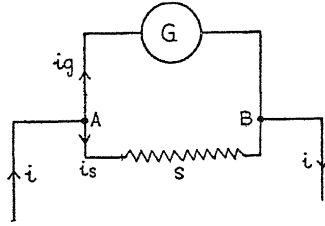
$$\therefore \quad \frac{i}{E} = \frac{1}{R} \text{ होगा।}$$

अतः $\frac{1}{R}=\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_2}$.

समानान्तर वद्ध चालकों की चालकता का योग समतुल्य चालकता के बराबर होता है।

सत्यापन (Verification)—इस नियम के सत्यापन के लिये r_1, r_2, r_3 को अलग-अलग A और B के बीच जोड़ कर उनका प्रतिरोध निकाल लीजिये। फिर तीनों को समान्तर क्रम में जोड़ कर A और B बिन्दुओं के बीच लगा कर समतुल्य प्रतिरोध निकालिये। आप देखेंगे कि इस प्रकार निकाले गये समतुल्य प्रतिरोध का विलोम r_1, r_2, r_3 के विलोम ($1/r_1$, $1/r_2$, $1/r_3$) के योग के बराबर है।

3.4. **पार्श्ववाही (Shunt)**—समानान्तर क्रम में जुड़नेवाला वह नीचा (low) प्रतिरोध है, जो धारामापी (Galvanometer) की शक्तिशाली धाराओं से रक्षा करने और एम्पियर मापी (Ammeter) की अवधि (range) बदलने के लिये प्रयुक्त होता है।

चित्र 34 में धारामापी G के समानान्तर में पार्श्ववाही S लगा है। मान लीजिये—

धारामापी का प्रतिरोध $=G$.
पार्श्ववाही का प्रतिरोध $=S$.
परिपथ की कुल धारा $=i$.
पार्श्ववाही की धारा $=i_s$.
धारामापी की धारा $=i_g$.
और बिन्दु A, B का विभवान्तर $=E$.
G और S के समतुल्य प्रतिरोध $=R$.

चित्र 34

अब G और S समान्तर क्रम में जुड़े हैं

$$\therefore \quad \frac{1}{R}=\frac{1}{G}+\frac{1}{S}.$$

$$=\frac{S+G}{GS}$$

$$\therefore \quad R=\frac{GS}{S+G}$$

ओह्म के नियम से A और B का विभवान्तर, पार्श्ववाही, धारामापी और समतुल्य प्रतिरोधों और उनमें बहनेवाली संगत धाराओं से निकालिये,

विभवान्तर $=$ धारा $\times$ प्रतिरोध

$$\therefore \quad E=i_s\times S=i_g\times G=i\times R.$$

$$\therefore \quad i_g=i.\frac{R}{G}.$$

$$=i.\frac{S}{G+S} \quad \left(\because\ R=\frac{GS}{G+S}\right).$$

$$\therefore\ \frac{i_g}{i}=\frac{S}{G+S}.$$

या, $\frac{i}{i_g}=\frac{G+S}{S}$

$$=G/S+1$$

$$\therefore\ \frac{G}{S}=\left(\frac{i}{i_g}-1\right)$$

और $S=\dfrac{G}{\left(\dfrac{i}{i_g}-1\right)}$ होगा।

अब यदि $\frac{i}{i_g}=10,\ 100,\ 1000$ हो

तो $S=\frac{G}{9},\ \frac{G}{99},\ \frac{G}{999}$ होगा।

अर्थात् यदि धारामापी में से कुल धारा का केवल $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ वा अंश ही बहाना है, तो पार्श्ववाही का प्रतिरोध धारामापी के प्रतिरोध का क्रमश: $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ होना चाहिये।

उदाहरण 1.—50 ओह्म आन्तरिक प्रतिरोध के धारामापी के वृत्ताकार पैमाने में 100 भाग हैं। जब उसमें 2×10^{-4} एम्पियर की धारा बहती है, तो निर्देशक एक भाग के बराबर विक्षेपित होता है। तो उस पार्श्ववाही का प्रतिरोध बताइये जो धारामापी को 5 एम्पियर तक नापनेवाले एम्पियर मापी (Ammeter) में बदल दे।

यहाँ पर धारामापी में 100 भाग का विक्षेप उस समय आना चाहिये जब कि परिपथ की कुल धारा 5 एम्पियर हो।

अब एक भाग विक्षेप के लिये $=2\times10^{-4}$ एम्पियर की धारामापी में बहती है।

$\therefore$ 100 भागों के लिये $=100\times2\times10^{-4}$

अर्थात्, i_g $=2\times10^{-2}=\cdot02$ एम्पियर।

और कुल धारा i $=5$ एम्पियर

अत: यदि पार्श्ववाही का प्रतिरोध S हो, तो,

$$S=\frac{G}{\left(\dfrac{i}{i_g}-1\right)}$$

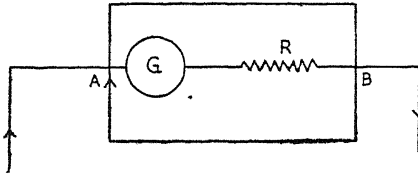
यहाँ $G = 50$ ओह्म

$$\frac{i}{i_g} = \frac{5}{\cdot 02} = 250$$

$$\therefore \quad S = \frac{50}{(250-1)}$$

$$= \frac{50}{249}$$

$= \cdot 2$ ओह्म लगभग

उदाहरण 2—इसी धारामापी के श्रेणीक्रम में कितना प्रतिरोध लगावें कि उससे 5 वोल्ट तक का विभवान्तर नापा जा सके।

चित्र 35

मान लीजिये, G के श्रेणी क्रम में जुड़ा हुआ प्रतिरोध R ओह्म है। A और B बिन्दु वोल्टमापी के बाहरी पेंच हैं। इन पेंचों के बीच कुल प्रतिरोध $= (G+R)$ ओह्म है।

और $G = 50$ ओह्म

अब A और B के बीच 5 वोल्ट का विभवान्तर होने से धारामापी में 100 भाग का विक्षेप होना चाहिये। परन्तु 100 भाग विक्षेप के लिये आवश्यक धारा $= \cdot 02$ एम्पियर

अतः ओह्म के नियम से,

विभवान्तर = धारा × प्रतिरोध

5 वोल्ट $= .02 \times (50+R)$

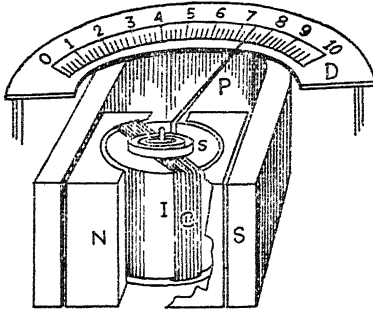
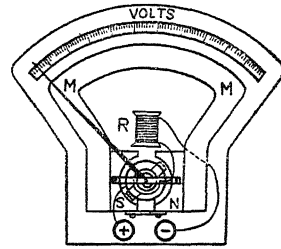
$$\therefore \quad 50+R = \frac{5}{\cdot 02} = 250$$

और $R = 250 - 50$

$= 200$ ओह्म

इन उदाहरणों से स्पष्ट है कि एक धारामापी के समानान्तर में उपयुक्त छोटा प्रतिरोध लगाने से एक एम्पियरमापी बन जाता है और वोल्टमापी बनाने के लिये एक ऊँचा उपयुक्त प्रतिरोध धारामापी के श्रेणीक्रम में जोड़ना चाहिये।

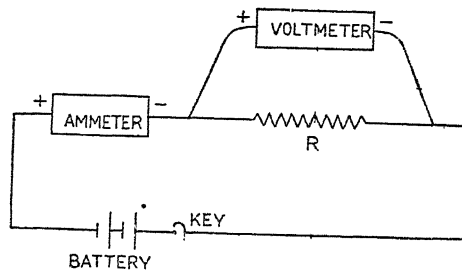
3.5. **एम्पियर मापी और वोल्टमापी को परिपथ में जोड़ना**—एम्पियर मापी परिपथ की कुल धारा की शक्ति नापता है। अतः कुल धारा एम्पियर मापी में से होकर बहना अनिवार्य है। इस लिये यह परिपथ के श्रेणीक्रम में जोड़ा जाता है जैसा कि चित्र 38 में दिखाया है। क्योंकि यह परिपथ के श्रेणीक्रम में जुड़ता है, अतः इसका समतुल्य प्रतिरोध बहुत कम होना चाहिये ताकि इसके जोड़ने से परिपथ का कुल प्रतिरोध

लगभग वही रहे और धारा न बदले। यदि प्रतिरोध अधिक हुआ तो जिस धारा को नापने के लिये परिपथ में जोड़ा जायेगा उसको ही बदल देगा।

चित्र 36

चित्र 37

इसलिये सैद्धान्तिक आधार पर एम्पियर (चित्र 36) एक नीचे प्रतिरोध का धारा मापी होता है जिसके समानान्तर में एक बहुत ही नीचे प्रतिरोध का पार्श्ववाही लगा होता है। चल कुंडल एम्पियर मापी एक संगत धारामापी की ही तरह होता है, केवल इसके कुंडल में चक्करों की संख्या अपेक्षाकृत कम होती है और मुख्य धारामापी के समान्तर में एक पार्श्ववाही लगा होता है। इससे समतुल्य प्रतिरोध और भी कम हो जाता है। एक आदर्श एम्पियर मापी का प्रतिरोध शून्य होना चाहिये।

वोल्टमापी (Voltmeter) (चित्र 37)—परिपथ के किन्हीं दो बिन्दुओं के बीच विभवान्तर नापता है। अतः उन्हीं दो बिन्दुओं के बीच समान्तर में इसका जोड़ा जाना आवश्यक है (चित्र 38)। ताकि विचाराधीन विभवान्तर के मान में कोई अन्तर न आये। वोल्टमापी के जोड़ने के बाद भी समस्त धारा मुख्य परिपथ में ही बहनी चाहिये। वोल्टमापी की धारा शून्य हो। अतः एक आदर्श वोल्टमापी का प्रतिरोध अनन्त होना चाहिये।

चित्र 38

व्यवहार में वोल्टमापी (चित्र 37) एक ऊँचे प्रतिरोध का धारा मापी है जिसके श्रेणीक्रम में एक अतिरिक्त ऊँचा प्रतिरोध जुड़ा रहता है। चलकुंडल वोल्टमापी की रचना ठीक चलकुंडल धारामापी जैसी होती है। केवल अन्तर इतना है कि इसके

कुंडल में अपेक्षाकृत अधिक चक्कर होते हैं और उसके श्रेणीक्रम में एक अतिरिक्त ऊँचा प्रतिरोध (R) यंत्र के अन्दर ही जुड़ा रहता है।

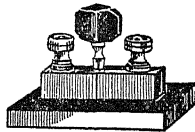
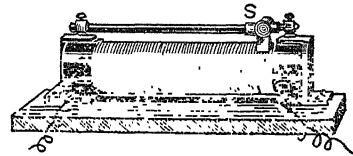
एम्पियरमापी और वोल्टमापी दोनों के वृत्ताकार पैमानों पर चिह्न (एम्पियर और वोल्ट के) वाईं ओर शून्य (0) से प्रारम्भ होकर दाईं ओर बढ़ते जाते हैं। पैमाने के दूसरे सिरे पर एम्पियर में धारा शक्ति (एम्पियरमापी) या वोल्ट में विभवान्तर (वोल्ट-मापी) का वह मान अंकित होता है, जो उस उपकरण विशेष से अधिक से अधिक नापा जा सकता है। धारा बहने पर निर्देशक P शून्य से दाईं ओर विक्षेपित होता है। बाईं ओर का विक्षेप वर्जित है। अतः उपकरण में बहनेवाली धारा की दिशा केवल एक ही होनी चाहिये जिससे केवल दाईं ओर का विक्षेप ही उत्पन्न हो।

इसके लिये एम्पियर मापी और वोल्ट मापी के बाहरी पेंचों पर (+) और (−) के चिह्न होते हैं। परिपथ में जोड़ते समय (+) पेंच ऊँचे और (−) पेंच नीचे विभववाले बिन्दु से जोड़ने चाहिये।

धारा मापी का निर्देशक पैमाने के बीच में होता है जहाँ उसका शून्य भी होता है। अतः इसमें दाईं और वाईं दोनों तरफ विक्षेप के लिये गुंजाइश है। इसके पेंचों पर (+) या (−) के चिह्न नहीं होते और परिपथ में जोड़ते समय किसी सावधानी की आवश्यकता नहीं। केवल यह ध्यान रहे कि प्रारम्भिक अवस्था में धारा मापी का पार्श्ववाही लगा रहना चाहिये।

3.6. कुछ अन्य आवश्यक उपकरण—

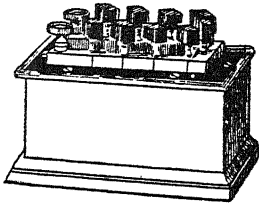
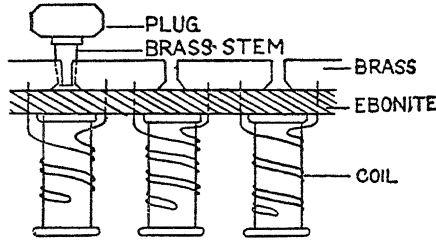
(i) **कुंजी (Key)**—इसकी सहायता से परिपथ को बन्द कर सकते हैं या तोड़ सकते हैं।

प्लग कुंजी (Plug key)—(चित्र 39) आबनूस की छोटी-सी आयताकार प्लेट पर पीतल के दो मोटे टुकड़े जड़े रहते हैं जिनके बीच खाली जगह रहती है। आबनूस की टोपीवाली एक पीतल की डाट इस खाली जगह में भर कर आती है। पीतल सुचालक है, अतः डाट लगा देने से परिपथ जुड़ जाता है। डाट निकाल लेने पर बीच में अचालक वायु रहती है और नीचे आबनूस अतः धारा नहीं वह सकती और परिपथ टूट जाता है।

चित्र 39

चित्र 40

(ii) **परिवर्तनशील प्रतिरोध (Rheostat)** (चित्र 40)—लकड़ी, आबनूस या चीनी मिट्टी के खोखले अचालक बेलन पर एक पृथक्कृत प्रतिरोध तार (कौंस्टेन्टन,

जर्मन सिल्वर, यूरेका आदि) लिपटा रहता है। तार के दोनों सिरे आधार पर लगे दो पेंचों से जुड़े रहते हैं। एक धातु की छड़ बेलन के समानान्तर लगी रहती है जिस पर एक संस्पर्शी पत्ती 'S' इधर-उधर सरक सकती है। छड़ में एक पेंच लगा रहता है।

परिपथ में एक बिन्दु आधार के किसी पेंच से और दूसरा छड़ में लगे पेंच से जोड़ते हैं। S पत्ती को सरका कर परिपथ में प्रभावित प्रतिरोध घटाया-वढ़ाया जा सकता है।

(iii) **प्रतिरोध बक्स (Resistance Box)** (चित्र 41)—परिपथ में निश्चित् और स्थिर ज्ञात प्रतिरोध लगाने के लिये बहुत से प्रतिरोध कुंडल श्रेणीक्रम में लगे रहते हैं जिनमें से इच्छानुसार किसी को भी परिपथ में लाया जा सकता है। आबनूस के आधार पर अंग्रेजी अक्षर U की आकृति की पंक्ति में थोड़ी-थोड़ी दूर पर पीतल के मोटे-मोटे

चित्र 41 चित्र 42

टुकड़े जड़े होते हैं। पास-पास के दो टुकड़ों के बीच वायु अनन्त प्रतिरोध का काम करती है। धारा नहीं जा सकती। परन्तु जब निश्चित् और ज्ञात प्रतिरोध के तार का एक-एक सिरा पास-पास के दो टुकड़ों में टाँके (solder) से जोड़ दिया जाता है, तो धारा इस तार से होकर जा सकती है और तार का प्रतिरोध परिपथ में आ जायेगा। परन्तु ऊपर के टुकड़ों के बीच खाली स्थान को पीतल की डाट (Plug) से बन्द कर देते हैं (चित्र 42) तो धारा सीधी पीतल में होकर चली जाती है और तार में धारा नगण्य रहती है। इसलिये यह प्रतिरोध परिपथ से कट जाता है।

प्रतिरोध के कुंडल बनाते समय विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण के प्रभाव को दूर करने के लिये मध्य से मोड़ कर तार को दुहरा कर लेते हैं और तब इस दुहरे तार को लकड़ी की बौबिन पर लपेटते हैं। [चित्र 42]

3.7. **सेल का आन्तरिक प्रतिरोध (Internal Resistance)**—सेल की दोनों प्लेटों के बीच का उत्तेजक द्रव (active liquid) विद्युत् प्रवाह में प्रतिरोध उपस्थित करता है। इसलिये प्लेटों को परस्पर पास सरकाने (लम्बाई घटाने) या प्लेटों का क्षेत्रफल बढ़ाने (अनुप्रस्थ क्षेत्र बढ़ाने) से आन्तरिक प्रतिरोध घट जाता है।

जब सेल को किसी बाह्य परिपथ में जोड़ा जाता है, तो पूर्ण वि० वा० बल का कुछ भाग बाह्य परिपथ में धारा बहाता है और शेष भाग आनन्तरिक प्रतिरोध का मुकावला करने में व्यय होता है।

ओह्म के नियम से परिपथ में

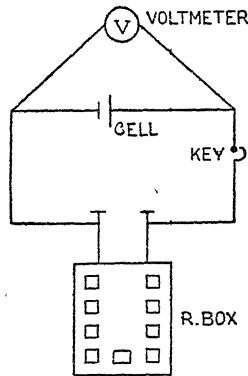
$$\text{धारा की शक्ति} = \frac{\text{कुल वि० वा० बल}}{\text{परिपथ का कुल प्रतिरोध}}$$

अत: बाह्य परिपथ में प्रभावित वि० वा० वल

=परिपथ की धारा × बाह्य प्रतिरोध

आन्तरिक परिपथ में कार्य करनेवाला वि० वा० बल

=धारा × आन्तरिक प्रतिरोध

अब चित्र 43 की भाँति परिपथ जोड़िये। कुंजी को विना दबाये वोल्ट मापी का पाठ=कुल वि० वा० बल=E वोल्ट

चित्र 43

प्रतिरोध बक्स में R ओह्म प्रतिरोध निकाल कर कुंजी दबाने पर वोल्ट मापी का पाठ=V वोल्ट

यदि आन्तरिक प्रतिरोध=r ओह्म,

अब बाहरी परिपथ में क्रियाशील वि० वा० बल =V वोल्ट

$\therefore$ बाह्य परिपथ की धारा=$\frac{V}{R}$ एम्पियर

आन्तरिक परिपथ में कार्य करनेवाला वि० वा० बल=$(E-V)$ वोल्ट

$\therefore$ आंतरिक परिपथकी धारा=$\frac{(E-V)}{r}$ एम्पियर

अब कुल परिपथ में धारा एक ही बहती है।

अत: बाह्य परिपथ की धारा=आन्तरिक धारा

$$\frac{V}{R}=\frac{E-V}{r}$$

$$\therefore \quad r = R\frac{E-V}{V} \text{ ओह्म}$$

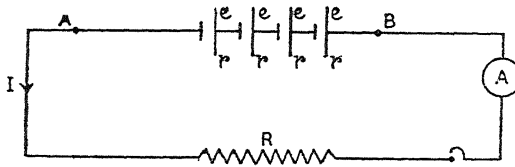
3.8. **सेलों का संगठन (Combination of cells)**—अधिक शक्तिशाली धारा प्राप्त करने के लिये प्राय: एक से अधिक सेलों को जोड़ कर बैटरी (Battery) बनाई जाती है। यह संगठन तीन प्रकार से होता है—

(a) श्रेणी क्रम (Series)

(b) समान्तर क्रम (Parallels)

(c) मिश्रित संगठन (Mixed combination)

(a) **श्रेणीक्रम**—एक सेल की ऋण प्लेट दूसरे की धन प्लेट से और दूसरे की ऋण प्लेट तीसरे की धन प्लेट से चालक तार द्वारा जोड़ने की क्रिया को जारी रख कर श्रेणीक्रम संगठन बनाया जाता है।

चित्र 44 में e वि० वा० बल और r ओह्म आन्तरिक प्रतिरोधवाली n सेल श्रेणीक्रम में जुड़ी हैं। इनसे R ओह्म बाह्य प्रतिरोध में I एम्पियर की धारा मिलती है।

चित्र 44

अब कुल आन्तरिक प्रतिरोध $= r+r+r+r$.............. n पदों तक

$= nr$ ओह्म

$\therefore$ परिपथ का कुल प्रतिरोध $= (R+nr)$ ओह्म

परिपथ का कुल वि० वा० बल $= e+e+e+e$.............. n पदों तक

$= ne$ वोल्ट

$\therefore$ परिपथ की धारा $I = \frac{ne}{R+nr}$

आन्तरिक प्रतिरोध के मान के अनुसार दो चरम अवस्थायें हो सकती हैं—

(i) $nr >> R$ आन्तरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध से अत्यधिक ऊँचा हो। R को छोड़ कर

$I = \frac{ne}{nr} = e/r =$ अकेली सेल द्वारा भेजी गई धारा।

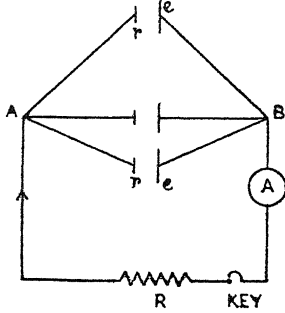
ऊँचे आन्तरिक प्रतिरोध की सेलों को श्रेणीक्रम में जोड़ने से कोई लाभ नहीं होता। जैसे कैडमियम सेल आदि

(ii) $R >> nr$ आन्तरिक प्रतिरोध नगण्य हो, तो

$I = \frac{ne}{R} = n.\, e/R =$ अकेली सैल की धारा से n गुनी।

सीसा संचायक सेल जैसी अति नीचे आन्तरिक प्रतिरोध की सेलों से अधिक धारा लेने के लिये श्रेणीक्रम में ही जोड़ना चाहिये।

(b) **समान्तर संगठन**—सब सेलों की धन प्लेट एक बिन्दु पर और ऋण प्लेट दूसरे एक बिन्दु पर जोड़ने से समानान्तर संगठन बनता है।

r ओह्म आन्तरिक प्रतिरोध और e वोल्ट वि० वा० बल की n सेल समान्तर क्रम में जोड़ कर बाह्य प्रतिरोध R ओह्म में I एम्पियर धारा बहती है। (चित्र 45)

चित्र 45

कुल आन्तरिक प्रतिरोध का विलोम

$= 1/r + 1/r + 1/r \ldots\ldots n$ पदों तक

$= n/r$

$\therefore$ कुल आन्तरिक प्रतिरोध $= r/n$ ओह्म

परिपथ का कुल प्रतिरोध $= (R + r/n)$ ओह्म

वि० वा० बल $= e$ वोल्ट केवल

$\therefore$ परिपथ की धारा $I = \dfrac{e}{R + r/n}$

अब (i) यदि $R >> r$ आन्तरिक प्रतिरोध नगण्य।

$I = e/R$

= अकेली सेल की धारा

अत्यधिक नीचे आन्तरिक प्रतिरोध की सेलों को समान्तर क्रम में जोड़ने से कोई लाभ नहीं होता।

(ii) यदि $r/n >> R$. आन्तरिक प्रतिरोध बहुत ऊँचा है। तो R को छोड़ कर,

$$I = \frac{e}{r/n} = n.\, e/r$$

= अकेली सेल से n गुनी धारा।

ऊँचे आन्तरिक प्रतिरोध की सेलों को समान्तर क्रम में जोड़ना चाहिये।

अतः यदि बाह्य प्रतिरोध आन्तरिक प्रतिरोध की अपेक्षा नगण्य है, तो सेलें समान्तर क्रम में जोड़ने से लाभ होता है और यदि आन्तरिक प्रतिरोध अपेक्षाकृत नगण्य है, तो सेलें श्रेणीक्रम में ही जोड़नी चाहिये।

(c) परन्तु यदि दोनों लगभग एक ही अवधि (range) के हो, तो मिश्रित संगठन काम में आता है।

चित्र 46 के संगठन में,

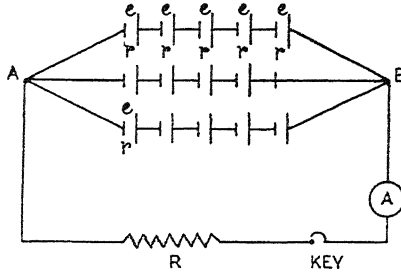
पंक्तियों की संख्या $= m$

एक पंक्ति में सेलों की संख्या $= n$

$\therefore$ कुल सेल $= m\, n = N$

एक सेल का वि० वा० बल $= e$ वोल्ट

एक सेल का आन्तरिक प्रतिरोध $= r$ ओह्म

बाह्य प्रतिरोध $= R$ ओह्म

चित्र 46

परिपथ की धारा $= I$ एम्पियर

एक पंक्ति का आन्तरिक प्रतिरोध $= nr$ ओह्म

$\therefore$ कुल आन्त० प्रति० $= \dfrac{nr}{m}$ ओह्म

परिपथ का कुल प्रति० $= \left(R + \dfrac{nr}{m}\right)$ ओह्म

एक पंक्ति का वि० वा० ब० $= ne$ वोल्ट

$\therefore$ संगठन का वि० वा० ब० $= ne$ वोल्ट केवल

$$\text{परिपथ की धारा } I = \frac{ne}{\left(R + \dfrac{nr}{m}\right)}$$

$$= \frac{mne}{(mR+nr)}$$

$$\therefore \quad \text{धारा} \quad I = \frac{Ne}{(mR+nr)}$$

इस भिन्न का अंश $= Ne =$ स्थिरांक है और किसी भी प्रकार बदला नहीं जा सकता।

परन्तु भिन्न का हर $= mR + nr$

$$= [(\sqrt{mR})^2 + (\sqrt{nr})^2]$$

$$= [(\sqrt{mR})^2 + (\sqrt{nr})^2 - 2\sqrt{mR}\sqrt{nr}] + 2\sqrt{mR}\sqrt{nr}$$

$$= [\sqrt{mR} - \sqrt{nr}]^2 + 2\sqrt{mn}\sqrt{Rr}]$$

द्वितीय पद $2\sqrt{mn}\sqrt{Rr}$ में mn सेलों की कुल संख्या N है, R बाह्य प्रतिरोध और r आन्तरिक प्रतिरोध है। अतः किसी को भी बदल नहीं सकते। प्रथम पद

$[\sqrt{mR}-\sqrt{nr}]^2$) पूर्ण वर्ग है। इसका मान कभी भी शून्य से कम नहीं हो सकता। आदर्श अवस्था में इसका मान न्यूनतम अर्थात् शून्य होगा। उसी समय धारा के भिन्नात्मक व्यंजक का हर न्यूनतम होगा और धारा अधिकतम होगी।

अतः उच्चतम धारा के लिये,

$$[\sqrt{mR}-\sqrt{nr}]^2=0$$

या, $\sqrt{mR}-\sqrt{nr}=0$ (वर्गमूल लेने से)

अथवा $\sqrt{mR}=\sqrt{nr}$

$\therefore$ $mR=nr$ (वर्ग करने से)

या $R=\frac{nr}{m}$

ध्यान से देखिये तो इस समीकरण का बायें हाथ का व्यंजक R बाह्य प्रतिरोध और दायें हाथ का व्यंजक $\frac{nr}{m}$ आन्तरिक प्रतिरोध के बराबर है।

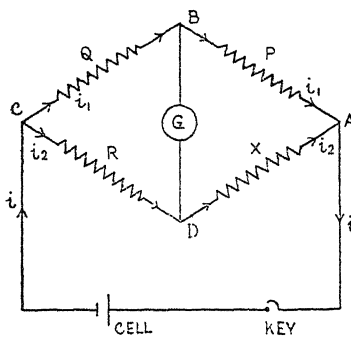
अतः अधिकतम धारा के लिये,

बाह्य प्रतिरोध=आन्तरिक प्रतिरोध

उस आदर्श अवस्था में परिपथ की उच्चतम धारा का मान,

$$I\ max=\frac{m\ n\ e}{2\sqrt{mn}\sqrt{Rr}}$$

$$=\frac{e}{2}\sqrt{\frac{mn}{Rr}} \text{ होगा।}$$

3.9. **"व्हीट्-स्टोन-सेतु" (Wheatstone Bridge) का सिद्धान्त**—(चित्र 47) AB, BC, CD और DA चालकों के प्रतिरोध क्रमशः P, Q, R, X ओह्म हैं। इन चारों को चित्र 46 की भाँति जोड़ा गया है। A और G बिन्दुओं के बीच कुंजी के साथ सैल और B व D के बीच एक संवेदन शील धारामापी G जुड़ा है। कुंजी दबाने पर धारा i C बिन्दु पर दो भागों में विभाजित हो जाती है। i_1 भुजा CB और i_2 भुजा CD में बहती है। P, Q, R, X के आपेक्षिक मान इस प्रकार चुने हैं कि धारामापी G में कोई विक्षेप नहीं आता। BD में धारा शून्य है और B D बिन्दु एक ही विभव पर हैं। अतः i_1 धारा ही CBA भुजा में बहेगी और भुजा CDA में i_2। A पर i_1 और i_2 मिल कर फिर i के रूप में आगे बहेगी।

चित्र 47

दो भुजाओं (CBA और CDA) में बहनेवाली दो विद्युत् धाराओं के बीच धारामापी भुजा (BD) एक सेतु (Bridge) के समान है। इसी कारण इस प्रबन्ध को सेतु कहते हैं। और क्योंकि व्हीट्-स्टोन ने सर्वप्रथम इस सेतु की खोज की इसलिये इसका नाम "व्हीट्-स्टोन-सेतु" (Wheatstone Bridge) है।

जब धारामापी की धारा शून्य हो गई तो सेतु सन्तुलित (Balanced) कहा जाता है। इस समय B का विभव $V_B = V_D$, D का विभव।

मान लीजिये A, C का विभव क्रमश: V_A, V_C है। ओह्म के नियम से किसी भी चालक में, विभवान्तर = धारा × प्रतिरोध

अत: CB और CD भुजाओं में,

$$V_C - V_B = i_1 Q \qquad V_C - V_D = i_2 R$$

अविक्षेप (Null) स्थिति में, $V_B = V_D$

$$\therefore \quad V_C - V_B = V_C - V_D$$

या, $i_1 Q = i_2 R$ .... (a)

आगे BA और DA भुजाओं से,

$$V_B - V_A = i_1 P, \qquad V_D - V_A = i\, X$$

परन्तु सेतु-सन्तुलन पर, $V_B = V_D$

$$\therefore \quad V_B - V_A = V_D - V_A$$

या, $i_1 P = i_2 X$ .... (b)

समीकरण (b) में (a) का भाग देने से,

$$X/R = P/Q$$

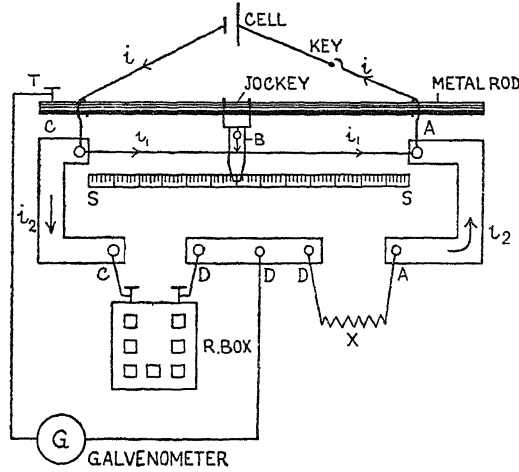
$$\therefore \quad X = R\frac{P}{Q}$$

इस प्रकार इन चारों में से किन्हीं भी तीन प्रतिरोधों का मान ज्ञात होने से चौथा निकाला जा सकता है। ध्यान से देखिये तो X की गणना के लिये R के अतिरिक्त P और Q के वास्तविक प्रतिरोध का ज्ञान अनिवार्य नहीं है। केवल P और Q का अनुपात P/Q ही चाहिये। इसीलिये AB और BC दोनों निष्पत्ति भुजायें (Ratio arms) कहलाती हैं।

यदि B और D में सैल तथा A और C में धारामापी जोड़ कर सेतु को सन्तुलित करते तो भी यही सम्बन्ध आता। और एक स्थिति में सन्तुलन करके यदि सैल और धारामापी को बदल दें तो भी सेतु सन्तुलित मिलेगा। इसीलिये AC और BD भुजाओं को "अनुबद्ध भुजायें" (Conjugate arms) कहते हैं।

AD भुजा "अज्ञात् भुजा" (unknown arm) कहलाती है और CD भुजा "ज्ञात भुजा" (known arm)।

व्हीट्-स्टोन सेतु के सिद्धान्त पर प्रतिरोध मापन के लिये (i) मीटर सेतु (Meter Bridge) और (ii) पोस्ट आफिस बक्स (Post-office Box) दो उपकरण बनाये गये हैं।

3.10. **मीटर सेतु (Meter Bridge)**—व्हीट् स्टोन सेतु के सिद्धान्त पर कार्य करने वाला उपकरण है जिसमें 1 मीटर लम्बा समरूप (uniform) प्रतिरोध तार प्रयुक्त होता है।

चित्र 48

रचना—लकड़ी के आधार पर *AA* और *CC* समकोण में दो बार मुड़ी धातु पत्तियाँ हैं (चित्र 48)। *ABC* 1 मीटर लम्बा प्रतिरोध तार है जिसके समान्तर एक ओर *SS* एक मीटर पैमाना है और दूसरी ओर धातु की मोटी छड़ (मोटी रेखा) है। इस छड़ पर सरकनेवाली *B* एक विसर्पी कुंजी (Jockey) है। *B* में लगे बटन को दबा कर तार से किसी भी बिन्दु पर सम्बन्ध किया जा सकता है और उस संस्पर्श बिन्दु की स्थिति पैमाने पर पढ़ी जा सकती है। *AA* व *CC* पत्तियों के बीच थोड़ा हट कर एक ओर *DDD* पत्ती है। मीटर पर विभिन्न बिन्दुओं पर नाम व्हीट-स्टोन सेतु के चित्र 46 के संगत ही रखे गये हैं।

विद्युत् परिपथ (Circuit)—मीटर सेतु से प्रायः किसी (i) तार (ii) धारामापी या (iii) सेल का प्रतिरोध निकालते हैं। प्रयोग करते समय, अज्ञात प्रतिरोध *AD* रिक्त स्थान में जोड़ा जाता है। *CD* रिक्त स्थान (Gap) में एक प्रतिरोध बक्स लगाते हैं। चित्र 46 की भाँति *AC* और *BD* क्रमशः सेल व धारामापी भुजाएँ हैं। इन दोनों भुजाओं में भी एक-एक कुंजी लगा देते हैं।

तार का प्रतिरोध निकालना—प्रतिरोध बक्स में से *R* ओह्म प्रतिरोध निकाल कर विसर्पी कुंजी *B* को तार पर इधर-उधर सरका कर ऐसी स्थिति लाइये कि सेल और

धारामापी भुजाओं की कुंजी दबाने से धारामापी में कोई विक्षेप न आये। ऐसा तभी हो सकता है, जब कि B और D बिन्दु एक ही विभव पर हों। इस समय मान लीजिये विसर्पी कुंजी A बिन्दु से l सें० मी० दूर है। तो,

$AB = l$ सें० मी०,

परन्तु $AC = 100$ सें० मी०

$\therefore$ $BC = (100 - l)$ सें० मी०

मान लीजिये, AB और BC तार के भागों का प्रतिरोध P, Q ओह्म है। तो सेतु की सन्तुलित स्थिति में चित्र (46) की भाँति,

$$P/Q = X/R$$

$$\therefore \quad X = R\frac{P}{Q} \text{ होगा।}$$

यदि तार के 1 सें० मी० का प्रतिरोध $= \rho$ ओह्म हो, तो,

$$P = l \times \rho \text{ ओह्म}$$

$$Q = (100 - l)\,\rho \text{ ओह्म}$$

$$\therefore \quad \frac{P}{Q} = \frac{l \times \rho}{(100 - l)\rho}$$

$$= \frac{l}{(100 - l)}$$

इस प्रकार सन्तुलन के समय तार के दो भागों की लम्बाई का अनुपात ही संगत प्रतिरोधों के अनुपात के बराबर होता है। और

$$X = R\frac{P}{Q}$$

$$= R\frac{l}{(100 - l)} \text{ ओह्म}$$

X की गणना के लिये तार के दोनों भागों के वास्तविक प्रतिरोधों की आवश्यकता नहीं।

अब यदि X के पदार्थ का विशिष्ट प्रतिरोध निकालना हो, तो उसकी लम्बाई L सें० मी० और पेंच मापी (Screw-gauge) की सहायता से अर्द्धव्यास r ज्ञात कीजिये।

उस समय $X = S\,\dfrac{L}{\pi r^2}$

या $S = X\dfrac{\pi r^2}{L}$ ओह्म सें० मी०

धारामापी का आन्तरिक प्रतिरोध निकालना—धारामापी को अज्ञात भुजा (unknown arm) AD में जोड़ दीजिये और धारामापी भुजा (BD) में

एक कुंजी के साथ तार जोड़ दीजिये। सेल कुंजी दबाने से धारामापी में विक्षेप ग्रायेगा। ग्रब प्रतिरोध बक्स से R ग्रोह्म प्रतिरोध निकाल कर विसर्पी कुंजी की वह स्थिति ज्ञात कीजिये जब कि धारामापी भुजा (BD) में लगी कुंजी को दबाने या छोड़ने से विक्षेप में कोई ग्रन्तर न ग्राये। उस समय सेतु सन्तुलित है ग्रौर धारामापी का प्रतिरोध

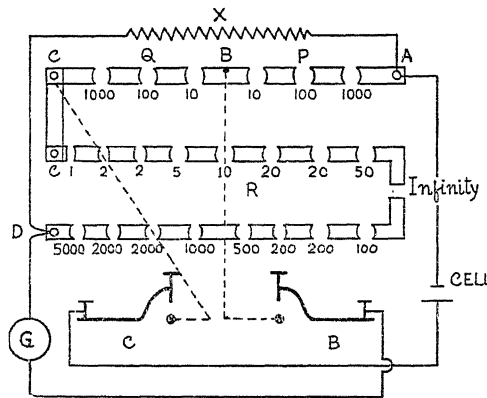
$G=R\ \dfrac{l}{(100-l)}$ होगा

सावधानी—प्रयोग के समय सेल के साथ ऊँचा प्रतिरोध डाल दो।

सेल का प्रतिरोध—इस बार सैल को ग्रज्ञात भुजा AD में जोड़िये ग्रौर सेल भुजा AC में एक कुंजी के साथ तार लगा दीजिये। पहले की भाँति वह स्थिति लाइये जब कि सेल भुजा की कुंजी को दबाने या छोड़ने से विक्षेप न बदले। इस सन्तुलित स्थिति से सेल का ग्रान्तरिक प्रतिरोध $r=R\ \dfrac{l}{(100-l)}$ होगा।

सावधानी—1. धारामापी के श्रेणीक्रम में एक ऊँचा प्रतिरोध डाल देना चाहिये।

2. प्रतिरोध बक्स से R ऐसा निकालो कि ग्रविक्षेप बिन्दु (null point) तार के मध्य में ग्राये। उसी समय मीटर सेतु के परिणाम शुद्ध होते हैं।

3.11. **पोस्ट ऑफिस बक्स (Post office Box)**—व्हीट-स्टोन-सेतु ही इसका सिद्धान्त है। डाकखानों में पहले तार भेजनेवाले तार का प्रतिरोध निकाल कर यह जानने के लिये प्रयुक्त होता था कि टेलीग्राफ लाइन (Telegraph line) कहाँ टूटी है।

चित्र 49

वास्तव में यह एक प्रतिरोध बक्स की भाँति है। श्रेणीबद्ध निष्पत्ति भुजाग्रों AB, BC में 10, 100, 1000 ग्रोह्म के प्रतिरोध लगे हैं। ज्ञात भुजा CD में

1 ओह्म से 5000 ओह्म तक के प्रतिरोध U आकृति की पंक्ति में समंजित (arranged) है। सब मिला कर पूरा पोस्ट ऑफिस बक्स अंग्रेजी के S अक्षर के अनुरूप लगता है। AC और BD भुजाओं में एक-एक कुंजी लगाने के लिये विन्दु B और C का सम्बन्ध आधार पर लगी दाव कुंजियों B और C से क्रमश: कर दिया जाता है।

तार का विशिष्ट प्रतिरोध निकालना—पोस्ट ऑफिस बक्स के चित्र 49 में नाम व्हीट-स्टोन-सेतु के चित्र 47 के अनुसार ही रखे गये हैं। अज्ञात प्रतिरोध भुजा AD में जुड़ा है। धारामापी बिन्दु D और कुंजी B के बीच तथा सेल बिन्दु A और कुंजी C के बीच जोड़ दिये गये हैं। इस प्रकार धारामापी भुजा में कुंजी B और सेल भुजा में कुंजी C है।

अवलोकन लेने की विधि निम्न तालिका से व्यक्त हो जायेगी—कुंजी दवाते समय यह ध्यान रहे कि पहले सेल कुंजी C और बाद में धारामापी कुंजी B दवानी चाहिये। अन्यथा प्रेरण के प्रभाव से अवलोकन दूषित हो जायेंगे। (जब सेल द्वारा स्थायी धारा प्रवाह होगा, तो प्रेरण का प्रभाव न होगा)।

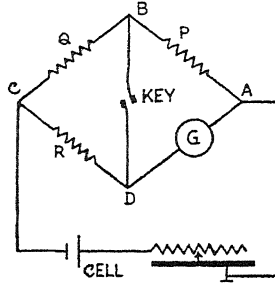
CB भुजा का प्रतिरोध P (ओह्म)	BC (भुजा का प्रतिरोध) Q (ओह्म)	निष्पत्ति $P:Q$	ज्ञात भुजा CD का प्रतिरोध R (ओह्म)	विक्षेप दायाँ, बायाँ, या शून्य (अविक्षेप)	$X=RP/Q$ का अनुमान (ओह्म)
10	10	10 : 10	2	दायाँ	
,,	,,	,,	3	बायाँ	2 और 3 के बीच
10	100	10 : 100	20	दायाँ	2 से अधिक
,,	,,	,,	30	बायाँ	3 से कम
,,	,,	,,	25	दायाँ	2·5 से अधिक
,,	,,	,,	26	बायाँ	2·5, 2·6 के बीच
10	1000	10 :1000	250	दायाँ	2·50 से अधिक
,,	,,	,,	255	शून्य	2·55
,,	,,	,,	256	बायाँ (बहुत कम)	2·56 से कम

अत: अज्ञात प्रतिरोध $X=2{\cdot}55$ ओह्म

विशिष्ट प्रतिरोध निकालना—अब तार X की लम्बाई L सें० मी० और अर्द्धव्यास r नाप लीजिये तो

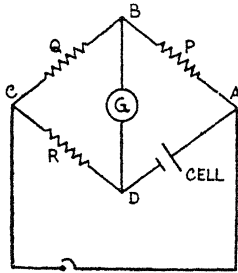
$$X=S\frac{L}{\pi r^2}$$

$$\therefore S=X\frac{\pi r^2}{L} \text{ ओह्म सें० मी०}$$

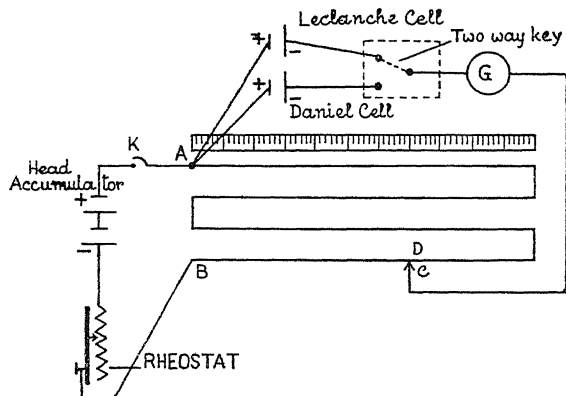
धारामापी का प्रतिरोध—कैल्विन-रीति (Kelvin Method)—अज्ञात् भुजा AD में धारामापी और धारामापी भुजा में B कुंजी व D बिन्दु के बीच तार जोड़िये। गत तालिका की भाँति निष्पत्ति भुजाओं से 100 : 100, 100 : 1000 और 10 : 1000

की निष्पत्ति क्रम से निकालिये । सेल कुंजी C दबाने से धारामापी में एक स्थायी विक्षेप आ जायेगा । CD में वह प्रतिरोध R निकालिये जिसके लिये सल कुंजी C दबाये हुए BD भुजा की कुंजी B दबाने और छोड़ने से विक्षेप न बदले । इस स्थिति में सेतु सन्तुलित है और धारामापी का प्रतिरोध, $G = R\frac{P}{Q}$ होगा ।

चित्र 50

यदि धारामापी में विक्षेप अधिक हो, तो सेल से श्रेणी बद्ध प्रतिरोध को बढ़ा दीजिये ।

सेल का आन्तरिक प्रतिरोध--मान्स की विधि (Mance's Method)--सेल को अज्ञात भुजा AD में जोड़िये और AC भुजा में एक कुंजी डाल दीजिये । बिन्दु A और कुंजी C को तार से जोड़ दो । धारामापी में कुंजी B दबाने से विक्षेप आयेगा । पूर्ववत् प्रयोग दुहराते हुए ऐसी स्थिति निकालिये कि सेल कुंजी C दबाने या छोड़ने पर भी विक्षेप वही रहे । इस समय सेल का आन्तरिक प्रतिरोध $r = R\frac{P}{Q}$

चित्र 51

इस बार धारामापी के श्रेणीक्रम में एक ऊँचा प्रतिरोध लगा लेना चाहिये ।

3.12. **विभव मापी (Potentiometer)**--विभवान्तर अथवा सेलों के वि० वा० बल की तुलना के लिये प्रयुक्त होता है ।

चित्र 52

कोस्टेन्टन, मैंगेनिन, यूरेका अथवा नाइक्रोम मिश्र धातु का 4 से 10 मीटर लम्बा

समरूप (uniform) तार एक-एक मीटर के समान्तर टुकड़ों के रूप में लकड़ी के एक आयताकार आधार पर बिछा रहता है। इन टुकड़ों की लम्बाई के समान्तर एक मीटर पैमाना लगा रहता है। मीटर सेतु की भाँति इसमें भी एक विसर्पी कुंजी (Jockey) होती है, जिसमें लगे बटनों की संख्या तार के टुकड़ों की संख्या के बराबर होती है।

परिपथ (Circuit)—लैक्लांशी और डैनियल सेलों के विभवान्तर की तुलना— विद्युत् परिपथ चित्र 52 में दिखाया है। विभवमापी के समस्त तार के दोनों सिरों A और B के बीच एक या दो सीसा संचायक सेल, परिवर्तनशील प्रतिरोध और कुंजी K लगा दीजिये। इसको "मुख्य परिपथ" (Main circuit) कहते हैं। A से संचायक सेल का धन पेंच (terminal) जुड़ा है।

लैक्लांशी और डैनियल दोनों सेलों की धन प्लेटें एक-एक तार से A बिन्दु पर और ऋण प्लेटें द्विपथ कुंजी (Two way key) के एक-एक पेंच से (अलग-अलग) जोड़ दीजिये। द्विपथ कुंजी के तीसरे पेंच और विसर्पी के कुंजी के बीच धारामापी (G) लगा दीजिये। इसको "गौण" (Subsidiary) परिपथ कहते हैं।

सिद्धान्त (Theory)—मान लीजिये, विभव मापी के तार की 1 सें० मी० लम्बाई का प्रतिरोध δ ओह्म है। मुख्य परिपथ कुंजी दबने से मान लीजिये तार में i एम्पियर की धारा बहती है। तो तार की एक सें० मी० लम्बाई के दोनों सिरों के बीच विभवान्तर

$$\mu = \delta i \text{ वोल्ट हुआ।}$$

क्योंकि A सिरा धन प्लेट से जुड़ा है, अतः विभव मापी के तार में A से B की ओर लम्बाई के साथ साथ विभव गिरता जायेगा। l सें० मी० दूर तार पर स्थित किन्ही भी दो विन्दुओं का विभवान्तर μl वोल्ट होगा।

"द्विपथ कुंजी" में लैक्लांशी सेल वाली डाट (Plug) लगा कर उसे गौण परिपथ में जोड़ दीजिये। सेल की धन प्लेट A से जुड़ी है, अतः दोनों एक ही विभव पर होंगी। ऋण प्लेट धारामापी के द्वारा विसर्पी कुंजी के बिन्दु C से जुड़ी है। (चित्र 52)। अतः जब तक धारामापी में धारा शून्य है बिन्दु C का विभव ऋण प्लेट के विभव के बराबर है। अतः लैक्लांशी सेल का वि० वा० बल E_L बिन्दु A और C के विभवान्तर के बराबर है जब कि गौण परिपथ में धारा शून्य है।

विसर्पी कुंजी का बटन दबा कर बिन्दु C को विभव मापी के पार के बिन्दु D से संस्पर्श कीजिये। बिन्दु A और D का विभवान्तर μl वोल्ट है यदि A और D के बीच तार की लम्बाई l सें० मी० है। तीन अवस्थायें हो सकती हैं—

(i) $\mu l > E_L$ गौण परिपथ में DCG की दिशा में धारा बहेगी और धारामापी में एक ओर विक्षेप आयेगा।

(ii) $\mu l < E_L$ गौण परिपथ में GCD की दिशा में धारा बहने से दूसरी ओर विक्षेप आयेगा।

(iii) $\mu l = E_L$ गौण परिपथ में धारा शून्य होगी और धारामापी में अविक्षेप (null) स्थिति रहेगी।

अब विसर्पी कुंजी को इधर-उधर सरका कर अविक्षेप स्थिति ज्ञात कीजिये। और अविक्षेप बिन्दु और A के बीच तार की लम्बाई l_1 सें० मी० नाप लीजिये।

अब लैक्लांशी सेल को हटा कर डैनियल सेल को गौण परिपथ में लाइये और पूर्ववत् उसके लिये संगत तार की लम्बाई l_2 सें० मी० ज्ञात कर लीजिये। अत:

लैक्लांशी का वि० वा० ब० $E_L = \mu l_1$ वोल्ट

डैनियल का वि० वा० ब० $E_D = \mu l_2$ वोल्ट

$$\therefore \quad \frac{E_L}{E_D} = l/l_2 \text{ होगा।}$$

सावधानी—1. मुख्य और गौण दोनों परिपथों की सेलों की धन प्लेटें (ऋण प्लेटें) तार के एक ही सिरे A पर जोड़ना चाहिये।

2. पहले लैक्लांशी (जिसका ऊँचा वि० वा० ब० को) सेल को गौण परिपथ में जोड़ कर मुख्य परिपथ के परिवर्तन शील प्रतिरोध की सहायता से ऐसा समंजन कीजिये कि अविक्षेप बिन्दु अन्तिम तार पर आवे। उसके बाद अन्य सेलों के लिये मुख्य परिपथ में प्रतिरोध नहीं बदलना चाहिये।

सारांश

ओह्म नियम—चालक के सिरों के विभवान्तर और बहानेवाली धारा की निष्पत्ति चालक के प्रतिरोध के बराबर होती है।

$$\text{प्रतिरोध} = \frac{\text{विभवान्तर}}{\text{धारा}}$$

प्रतिरोध की व्यवहारिक इकाई ओह्म है।

विशिष्ट प्रतिरोध—एक सें० मी० लम्बे और 1 वर्ग सें० मी० अनुप्रस्थ क्षेत्र के चालक का प्रतिरोध पदार्थ के वि० प्रति० के बराबर होता है। 1 सें० मी० धन का प्रतिरोध भी वि० प्रति० के बराबर है।

श्रेणीबद्ध प्रतिरोधों का योग समतुल्य प्रतिरोध के बराबर होता है।

समानान्तर क्रम में प्रतिरोधों के विलोम का योग समतुल्य प्रतिरोध के विलोम के बराबर होता है।

अधिकतम धारा के लिये एक से अधिक सेलों को मिश्रित संगठन में इस प्रकार जोड़िये कि कुल आन्तरिक प्रतिरोध बाह्य प्रतिरोध के बराबर हो।

P, Q, R और X से बने व्हीट-स्टोन-सेतु की सन्तुलन स्थिति में,

$$\frac{P}{Q} = \frac{X}{R}$$

$$\therefore \quad X = R\frac{P}{Q}.$$

विभवमापी से लक्लांशी और डैनियल सेल के वि० वा० बलों का अनुपात

$$\frac{E_L}{E_D} = \frac{l_1}{l_2}$$

यहाँ l_1, l_2 तार की अविक्षेप के लिये संगत लम्बाइयाँ हैं।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. "ओह्म नियम" की व्याख्या कीजिये। नियम के सत्यापन के लिये प्रयोग वर्णन कीजिये।
2. "विशिष्ट प्रतिरोध" की परिभाषा कीजिये। मीटर सेतु से तार का वि० प्रतिरोध निकालने की विधि बताइये।
3. प्रतिरोधों के श्रेणीक्रम और समानान्तर क्रम के नियमों का निवेदन कीजिये और उनके सत्यापन के लिये प्रयोग बताइये।
4. कई सेलों को मिला कर अधिकतम धारा देनेवाली बैटरी बनानी है। आवश्यक शर्तें बताइये।
5. व्हीट्-स्टोन-सेतु का सिद्धान्त समझाइये। पोस्ट ऑफिस बक्स के विविध प्रयोग समझाइये।
6. विभव मापी का सिद्धान्त समझाइये। इसकी सहायता से दो सेलों के वि० वा० बलों की तुलना कैसे करेंगे?
7. क्रमश: 3 व 2 ओह्म प्रतिरोध के दो तार समानान्तर बद्ध हैं। इनको 4 ओह्म के तीसरे तार के श्रेणीक्रम में जोड़ दिया गया। अब ·8 ओह्म आन्तरिक प्रतिरोध की बैटरी के साथ परिपथ पूरा करने से मुख्य धारा 0·5 एम्पियर आती है। बटरी की प्लेटों का विभवान्तर बताइये तथा बैटरी का वि० वा० बल भी निकालिये।
8. दो कुंडल जिनके प्रतिरोध क्रमश: 100 ओह्म और 200 ओह्म हैं, 4 वोल्ट की एक बैटरी से संबद्ध किए जाते हैं। बैटरी का प्रतिरोध उपेक्षणीय है। 200 ओह्म के वोल्टमापी को पारी-पारी से पूर्वोक्त कुंडलों के सिरों से संबद्ध किया जाता है, तो इन दशाओं में क्या-क्या वोल्टेज होगा? **(उत्तर—**1 वोल्ट, 2 वोल्ट**)**
9. एक गैल्वेनोमीटर में, जिसका प्रतिरोध 30 ओह्म है, निर्देशक और पैमाना लगा है। स्केल पर 100 अंश हैं। जब गैल्वेनोमीटर में 2×10^{-4} एम्पियर की धारा चलती है, तो निर्देशक एक अंश हट जाता है। गैल्वेनोमीटर को 5 एम्पियर वाले अम्मीटर में परिणत करने के लिए कितने प्रतिरोध का Shunt आवश्यक होगा? **(उत्तर—**12 ओह्म**)**
10. एक मिली-अम्मीटर का, जो केवल 5 मिली एम्पियर तक धारा नाप सकता है, प्रतिरोध 5 ओह्म है। इससे (a) 25 मिली एम्पियर (b) 100 वोल्ट किस प्रकार नापे जा सकते हैं? **(उत्तर—**समानान्तर क्रम में 1·25 ओह्म लगा कर, श्रेणी में 19995 ओह्म लगा कर**)**
11. एक यंत्र, जिसका प्रतिरोध 100 ओह्म है, सम्पूर्ण विचलन (deflection) पर 10 वोल्ट प्रकट करता है। उसका परास (range) 100 वोल्ट किस प्रकार करिएगा? (श्रेणीक्रम में 900 ओह्म का प्रतिरोध लगा कर)
12. 12 सेल, जिनमें प्रत्येक का *E.M.F*, 1·5 वोल्ट तथा आन्तरिक प्रतिरोध, ·1 ओह्म है, श्रेणी-समान्तर (Serie-parallel) क्रम में पहले 4·5 वोल्ट का *E.M.F.* और

बाद में 6 वोल्ट प्राप्त करने के लिए क्रमबद्ध किए जाते हैं। यदि प्रत्येक बार इन सैलों के संयोजन को 4 ओह्म के बाहरी प्रतिरोध से जोड़ा जाय, तो धारा की मात्रा निकालो। (1·104, 1·451 एम्पियर)

13. A, B, C, D चार वेष्ठन हैं, जिनके प्रतिरोध क्रमशः 2, 2, 2 तथा 3 ओह्म हैं। ये व्हीट-स्टोन-सेतु के रूप में क्रमबद्ध किए जाते हैं। वैष्ठन D में कितने ओह्म का शंट लगाया जाए कि सेतु संतुलित हो जाय। **(उत्तर**—6 ओह्म)

14. एक बैटरी के सिरों को एक उच्च प्रतिरोध के वोल्टमापी से संबद्ध करने पर 15 वोल्ट का पाठ्यांक मिलता है। इसके बाद सिरों को एक एमीटर से संबद्ध किया जाता है, तब एमीटर 1·5 एम्पियर का पाठ देता है और वोल्ट मापी 9 वोल्ट का समझाओ कि वोल्टमापी का पाठ क्यों गिर जाता है, और (i) बैटरी तथा (ii) ऐमीटर और संयोजक तारों के प्रतिरोधों की गणना करो। **(उत्तर**—6 ओह्म, 4 ओह्म)

15. पोटेन्शियोमीटर तार की 196 सें० मी० लम्बाई, एक 1·2 ओह्म आन्तरिक प्रतिरोध के सेल का *E.M.F.* संतुलित करती है। तार की वह लम्बाई निकालो, जो सैल के सिरों पर विभवान्तर को संतुलित करेगी, जब कि 5 ओह्म का प्रतिरोध उसके ध्रुवों को जोड़ दिया जाता है। **(उत्तर**—158·1 सें० मी०)

अध्याय 4

विद्युत् धारा के तापीय प्रभाव और ताप-विद्युत्

(Thermal Effects of Current and Thermal Electricity)

4.1. इलैक्ट्रन सिद्धान्त के अनुसार विद्युत् धारा बहुत से इलैक्ट्रनों की तीव्र गति से उत्पन्न होती है। धारा की दिशा हम वह मानते हैं जिसमें धन आवेश बहना चाहिये। धन आवेश तो परमाणु के नाभिक पर होता है, जो धारा के बहने में भाग नहीं ले सकता, क्योंकि उसका भार इलैक्ट्रन से कई हजार गुना होता है। अतः वास्तव में धारा केवल इलैक्ट्रनों की गति से ही बनती है।

ये इलैक्ट्रन जब किसी चालक में तीव्र वेग से गतिमान होते हैं तो मार्ग में आनेवाले परमाणुओं से टकराते हैं। इस टक्कर से इलैक्ट्रनों की गतिज ऊर्जा व्यय होती है। परन्तु ऊर्जा के अविनाशता नियम (Law of Indestructibility of Energy) के अनुसार इस खोई हुई गतिज ऊर्जा के समतुल्य (Equivalent) उष्मा ऊर्जा (Heat energy) उत्पन्न होती है। इसके परिणाम स्वरूप चालक के परमाणु अपनी अपनी मध्य स्थिति के परितः (about) ज़ोर से कम्पन करने लगते हैं। इनको "तापीय कम्पन" (Thermal Vibrations) कहते हैं।

विद्युत् वल्ब का गर्म हो कर उद्दीप्त होना, विकीर्णक (Radiator) का कमरे को गर्म करना, विद्युत् हीटर (Heater) से उष्मा प्राप्त होना—ये सब विद्युत् के इसी तापीय प्रभाव के परिणाम हैं। इन सब उपकरणों में उत्पन्न होनेवाली उष्मा बहनेवाली विद्युत् धारा की ऊर्जा का ही रूपान्तर है।

4.2. **विद्युत् धारा से उत्पन्न हुई उष्मा (Heat)**—मान लीजिये R ओह्म प्रतिरोध के चालक में C एम्पियर की धारा t सैकिंड तक बहने से H कैलारी (calorie) उष्मा उत्पन्न करती है तथा विद्युत् प्रवाह के समय चालक के सिरों का विभवान्तर E वोल्ट रहता है। विभवान्तर की परिभाषा के अनुसार, स्थायी विभवान्तर 1 वोल्ट के साथ 1 कूलम्ब धनावेश स्थानान्तरित होने में 1 जूल कार्य मुक्त होगा। यहाँ पर सब राशियाँ संगत व्यवहारिक इकाइयों में व्यक्त की गई हैं।

अब,

धारा = आवेश प्रवाह की दर

$$= \frac{\text{आवेश}}{\text{समय}}$$

∴ C एम्पियर धारा से t से० में प्रवाहित कुल

आवेश = धारा × समय

∴ $Q = Ct$ कूलम्ब

अब 1 वोल्ट विभवान्तर पर 1 कूलम्ब स्थानान्तरण में मुक्त कार्य = 1 जूल

∴ E वोल्ट विभवान्तर पर Q कूलम्ब आवेश स्थानान्तरण में

मुक्त हुआ कार्य $W = E \times Q$ जूल

$= ECt$ जूल $(Q = Ct)$

मुक्त हुआ कुल कार्य $W = ECt \times 10^7$ अर्ग (1 जूल $= 10^7$ अर्ग)

यदि यह कार्य पूर्ण रूपेण उष्मा ऊर्जा में परिणत हो जाय, तो कुल उत्पन्न हुई उष्मा

$H = W/J$ कैलारी

यहाँ $J = 4{\cdot}2 \times 10^7$ अर्ग/कैलारी उष्मा का यांत्रिक तुल्यांक (Mechanical Equivalent of Heat) है।

अतः उत्पन्न हुई कुल उष्मा $H = \dfrac{ECt \times 10^7 \text{ अर्ग}}{4{\cdot}2 \times 10^7 \text{ अर्ग/कैलारी}}$

$$= \frac{ECt}{4{\cdot}2} \text{ कैलारी}$$

$$H = {\cdot}24 \; ECt \text{ कैलारी} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

परन्तु ओह्म के नियम से,

विभवान्तर = धारा × प्रतिरोध

$E = CR$

∴ विद्युत् ऊर्जा से रूपान्तरित उष्मा ऊर्जा,

$$H = \cdot 24\ C^2Rt \text{ कैलारी} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

या, $$H = \cdot 24 \frac{E^2}{R} t \text{ कैलारी} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

क्योंकि $C = E/R$

अतः उत्पन्न हुई उष्मा (1), (2), (3) किसी भी समीकरण द्वारा ज्ञात हो सकती है।

इस प्रसंग में हमने यह मान लिया है कि धारा की खोई हुई समस्त ऊर्जा पूर्णतया उष्मा ऊर्जा में परिणत हो जाती है।

4.3 **जूल के नियम (Joule's Laws)**—विद्युत् धारा के वहन से उत्पन्न उष्मा, $H = \cdot 24\ C^2Rt$ कैलारी

यह सम्बन्ध बहुत ही महत्वपूर्ण है। जूल के नियमों का गणितीय रूप इसी सम्बन्ध से व्यक्त होता है। इस समीकरण के आधार पर हम तीन नियमों का निवेदन कर सकते हैं—

(i) $H \propto C^2$ यदि R और t स्थिर रहें।

निश्चित प्रतिरोध के चालक में दिये हुए समय में उत्पन्न हुई उष्मा धारा के मान के वर्ग के समानुपाती होती है।

(ii) $H \propto R$ यदि C और t स्थिर रहें।

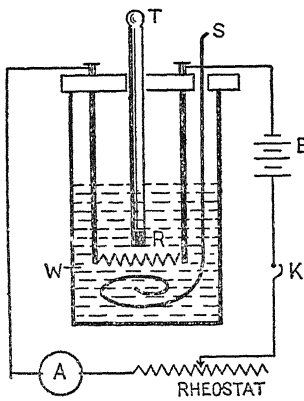
दिये हुए मान की धारा एक निश्चित समय में चालक के प्रतिरोध के समानुपात में उष्मा उत्पन्न करती है।

(iii) $H \propto t$ यदि C और R स्थिर रहें।

एक दिये हुए चालक में उत्पन्न हुई उष्मा प्रवाह समय के समानुपाती होती है, यदि धारा का मान स्थिर रहे।

चित्र 53

सत्यापन (Verification)—

(i) **प्रथम नियम** ($H \propto C^2$)—चित्र 53 की भाँति एक कलारी मापी के मुँह में लगे आबनूस के ढक्कन में जड़ी पीतल की दो पतली छड़ों के बीच एक मैंगेनिन का प्रतिरोध R लगा दीजिये। ताप मापी T और विलोलक S को चित्र की भाँति रखिये। ढकने में लगे दो पेंचों से सीसा संचायक बैटरी B, कुंजी K परिवर्तनशील प्रतिरोध और एम्पियर मापी जोड़ दीजिये।

अब मान लीजिये,

कैलारी मापी की संहति $= m$ ग्राम

कैलारी मापी की वि० उष्मा $= S$ कैलारी/ग्राम/°C

कैलारी मापी में भरे पानी की संहति $= \omega$ ग्राम

पानी व कैलारी मापी का प्राथमिक ताप$= T_1$°C

अब कुंजी K को दबा कर और परिवर्तनशील प्रतिरोध की सहायता से एक स्थिर मान की धारा बहाइये। यदि,

धारा का मान $= C_1$ एम्पियर

धारा-प्रवाह का समय $= t$ सेकिंड

अन्तिम ताप $= T_2$°C

कैलारी मापी और पानी द्वारा ली हुई कुल उष्मा $H_1 = (mS + \omega)\ (T_2 - T_1)$ कैलारी

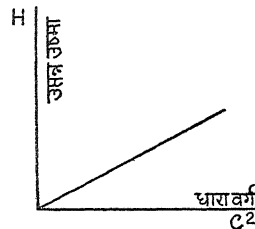
इस प्रयोग को कई बार दुहराइये। हर बार धारा प्रवाह का समय तो t सेकिंड ही रखिये। परन्तु हर बार धारा का मान बदल दीजिये। और प्रत्येक बार उत्पन्न हुई उष्मा की गणना करते जाइये।

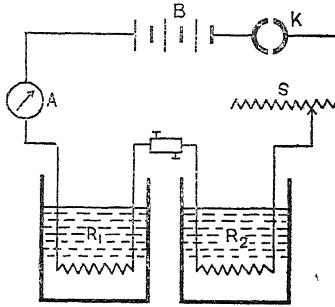
अपने निरीक्षणों की इस प्रकार तालिका बनाइये—

क्रमाङ्क	धारा प्रवाह समय से०	धारा का मान C एम्पियर	उष्मा H कैलारी	$\frac{H}{C^2}$
1	t	C_1	H_1	H_1/C_1^2
2	t	C_2	H_2	H_2/C_2^2
3	t	C_3	H_3	H_3/C_3^2
4	t	C_4	H_4	H_4/C_4^2

आप देखेंगे कि लगभग,

$$\frac{H_1}{C_1^2} = \frac{H_2}{C_2^2} = \frac{H_3}{C_3^2} = \frac{H_4}{C_4^2}$$

इसके अतिरिक्त यदि आप H को Y अक्ष और C^2 को X–अक्ष पर लेकर ग्राफ खींचें तो एक ऋजु रेखा आयेगी जो मूल विन्दु से जाती है।

(ii) **द्वितीय नियम** ($H \propto R$)—चित्र 54 की भाँति कई कैलारी मापियों में पानी भर कर उनमें R_1, R_2 आदि प्रतिरोध के तार डुबा दीजिये।

इन सब प्रतिरोधों को श्रेणीक्रम में जोड़ कर सीसा संचायक बैटरी B से एक ही मान की धारा उनमें बहाइये। धारा का मान परिवर्तनशील प्रतिरोध S से नियंत्रित करके एम्पियर मापी (A) पढ़ लीजिये।

चित्र 54

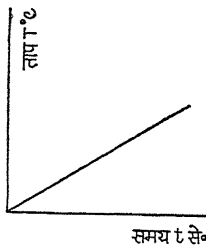
मान लीजिये विभिन्न कैलारी मापियों के लिये,

कैलारी मापी की संहति $= m_1,\ m_2,$ आदि
वि० उष्मा $= S$
पानी की संहति $= W_1,\ W_2, \ldots$
प्राथमिक ताप $= T_1,\ T_2, \ldots.$
डूबा हुआ प्रतिरोध $= R_1,\ R_2, \ldots.$
धारा $= C$
समय $= t$ से०
अन्तिम ताप $= T_1',\ T_2' \ldots$

$\therefore$ उत्पन्न हुई उष्मा $= (m_1S+W_1)(T_1'-T_1), (m_2S+W_2)(T_2'-T_2),$
$= H_1, H_2 \ldots\ldots$

अन्त में आप देखेंगे कि सब कैलारी मापियों के लिये,

$$\frac{H_1}{R_1}=\frac{H_2}{R_2}=\frac{H_3}{R_3}$$

(iii) **तृतीय नियम** ($H \propto t$)—चित्र 53 की भाँति फिर परिपथ बनाइये। एक स्थिर मान की धारा बहने पर एक-एक मिनट के बाद ताप मापी से ताप पढ़ते जाइये। चित्र 55 की भाँति Y अक्ष पर ताप और X–अक्ष पर समय ले कर ग्राफ खीचिये। आप देखेंगे कि मूल बिन्दु से जानेवाली एक ऋजु रेखा आती है। इससे स्पष्ट है कि,

तापवृद्धि $\propto$ समय

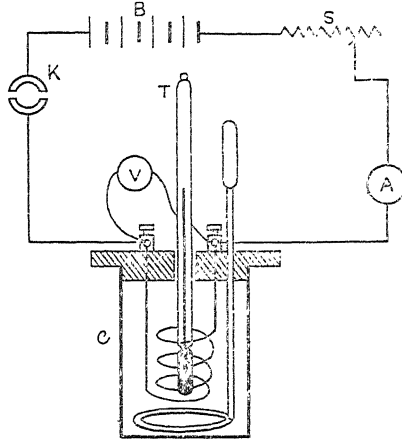
चित्र 55

परन्तु उत्पन्न हुई उष्मा = (पानी + कैलारीमापी का जल तुल्यांक) × तापवृद्धि

अब (पानी + कैलारीमापी का जल तुल्यांक) सब निरीक्षणों के लिये स्थिर है। अतः

उत्पन्न हुई उष्मा $\propto$ समय

4.4. **उष्मा का यांत्रिक तुल्यांक J निकालना**—ताँबे के कैलारी मापी C के मुँह में लगे लकड़ी या आबनूस के ढक्कन में दो संयोजक पेंच लगे हैं। इनका संबंध नीचे दो ताँबे के मोटे तारों से है जिनके बीच मगेनिन, यूरेका या नाइक्रोम का प्रतिरोध (लगभग 5 ओह्म) लगा है। ढकने के छेदों से पानी में नीचे एक तापमापी और एक विलोड़क (stirrer) जाते हैं।

संयोजक पेंचों के समानान्तर में एक वोल्ट मापी V लगा है। अब सीसा संचायक बैटरी B से एक धारा बहाइये जिसका मान परिवर्तन शील प्रतिरोध S से

चित्र 56

नियंत्रित कीजिये। एक रोक घड़ी की सहायता से धारा के बहने का समय भी ज्ञात कर लीजिये।

अब मान लीजिये,

कैलारी मापी की संहति	$=m$ ग्राम
वि० उष्मा	$=S$ कैलारी/ग्राम/$^\circ C$
पानी की संहति	$=W$ ग्राम
प्रारम्भिक ताप	$=T_1{}^\circ C$
धारा का मान	$=C$ एम्पियर
प्रतिरोध के बीच विभवान्तर	$=E$ वोल्ट
धारा बहने का कुल समय	$=t$ सेकिंड
अन्तिम ताप	$=T_2{}^\circ C$
कैलारी मापी द्वारा ली गई उष्मा	$=mS\ (T_2-T_1)$ कैलारी
पानी द्वारा ली गई उष्मा	$=W(T_2-T_1)$ कैलारी
कुल उत्पन्न हुई उष्मा	$H=(mS+W)\ \ (T_2-T_1)$ कैलारी
कुल व्यय हुई विद्युत् ऊर्जा	$W=ECt$ जूल
	$=ECt\times 10^7$ अर्ग

अतः उष्मा का यांत्रिक तुल्यांक $J \quad =\dfrac{W}{H}$

$$= \frac{ECt \times 10^7 \text{ अर्ग}}{(mS+W)\ (T_2-T_1) \text{ कैलारी}}$$

$$= \frac{ECt}{(mS+W)\ (T_2-T_1)} \times 10^7 \text{ अर्ग/कैलारी}$$

4.5. **विद्युत् शक्ति (Electric Power)**—E वोल्ट स्थिर विभवान्तर पर C एम्पियर की धारा t सेकिंड तक वहने पर ECt जूल कार्य मुक्त करती है।

$\therefore$ प्रति से० मुक्त हुआ कार्य $= \frac{ECt}{t} = EC$ जूल

परन्तु शक्ति = कार्य करने की दर

$$= \frac{\text{कार्य}}{\text{समय}}$$

शक्ति की व्यवहारिक इकाई वॉट (Watt) है। और 1 वॉट = 1 जूल प्रति से०

$\therefore$ E वोल्ट विभवान्तर की C एम्पियर की धारा से मुक्त हुई

शक्ति $= EC$ जूल/से०

$= EC$ वॉट

अब 1 किलो वॉट = 1000 वॉट

$\therefore$ धारा की शक्ति $= \frac{EC}{1000}$ किलोवॉट

अतः शक्ति $= \frac{\text{वोल्ट} \times \text{एम्पियर}}{1000}$ किलोवॉट

$=$ वोल्ट $\times$ एम्पियर वॉट

4·6. **विद्युत् ऊर्जा का मूल्य**—महीने के अन्त में विद्युत् कम्पनियाँ विद्युत् उपभोक्ताओं (Consumers) के पास एक 'बिल' (Bill) भेजती हैं। बिल में एक स्थान पर यह अंकित रहता है कि आपने कुल कितनी इकाई (Unit) विद्युत् ऊर्जा (Electric energy) खर्च की है। और दूसरे स्थान पर उसका मूल्य लिखा रहता है, जो आपको देना है।

विद्युत्-ऊर्जा का मूल्य निकालने के लिये विद्युत्-कम्पनियों में ऊर्जा की एक विशेष इकाई प्रचलित है, जिसे "यूनिट" (Unit), या बोर्ड ऑफ ट्रेड यूनिट (Board of Trade Unit) अथवा केवल "B. O. T. Unit" भी कहते हैं। इसका दूसरा नाम "किलोवाट आवर" (Kilowatt Hour) भी है।

एक किलोवाट (Kilowatt) शक्ति (Power) की दर से एक घंटे में व्यय हुई ऊर्जा,

1 किलोवाट आवर = 1000 वाट $\times$ 3600 से०

$$=1000\times \frac{\text{जूल}}{\text{से०}}\times 3600 \text{ से०}$$

$$=36\times 10^5 \text{ जूल}$$

$$=36\times 10^5\times 10^7 \text{ अर्ग}$$

∴ एक B. O. T. Unit$=36\times 10^{12}$ अर्ग

अब गत धारा की भाँति E विभवान्तर पर C एम्पियर की धारा H घंटे तक बहने से मुक्त हुई ऊर्जा,

$$=\frac{EC}{1000} \text{ किलोवाट}\times H \text{ घंटे}$$

$$=\frac{ECH}{1000} \text{ किलोवाट आवर (घंटे)}$$

$$=\frac{ECH}{1000} \text{B. O. T. इकाई}$$

$$\text{अतः कुल B. O. T. इकाई}=\frac{\text{वोल्ट}\times\text{एम्पियर}\times\text{घंटे}}{1000}$$

$$=\frac{\text{वाटेज (Wattage)}\times\text{घंटे}}{1000}$$

यहाँ वाटेज (Wattage) $=$वोल्ट$\times$एम्पियर

यंत्र विशेष की शक्ति (Power) वाट (Watts) में व्यक्त की गई है।

उदाहरण—1. एक चालक के सिरों के बीच 50 वोल्ट विभवान्तर है और 4 एम्पियर की धारा बहती है। 42 मिनट में कितनी उष्मा उत्पन्न होगी ?

जूल के नियमानुसार उष्मा$=\frac{ECt}{4.2}$ कैलारी

यहाँ $E=50$ वोल्ट, $C=4$ एम्पियर, $t=42\times 60$ से०

$$\therefore \quad \text{उष्मा}=\frac{50\times 4\times 42\times 60}{4{\cdot}2}$$

$$=12\times 10^4 \text{ कैलारी}$$

उदाहरण—2. एक मकान में 60 वाट के 10 बल्ब 5 घंटे प्रतिदिन जलते हैं। 500 वाट का एक स्टोव भी 10 मिनट रोज़ाना प्रयोग होता है। 25 नये पैसे प्रति इकाई की दर से 30 दिन के महीने में कितने रुपये का बिल आयेगा। यदि सप्लाई 250 वोल्ट पर होती है, तो बल्ब में लगे तार का प्रतिरोध बताइये।

$$\text{B.O.T. इकाई}=\frac{\text{वाट}\times\text{घंटे}}{1000}$$

$\therefore$ 10 बल्बों में एक दिन में व्यय हुई

$$\text{ऊर्जा} = \frac{60 \times 5}{1000} \times 10$$

$$= 3 \text{ यूनिट}$$

$\therefore$ 30 दिन में $= 3 \times 30 = 90$ यूनिट

स्टोव में 1 दिन में व्यय हुई ऊर्जा $= \dfrac{500 \times \frac{1}{6}}{1000}$

$$= \frac{1}{12} \text{ यूनिट}$$

$\therefore$ 30 दिन में $= \dfrac{30}{12} = 2{\cdot}5$ यूनिट

महीने में कुल यूनिट $= 90 + 2{\cdot}5$

$= 92{\cdot}5$ यूनिट

$\therefore$ मूल्य $= 92{\cdot}5 \times 0{\cdot}25$ रुपये

$= 23{\cdot}125$ रुपये

बल्ब की शक्ति $=$ वोल्ट $\times$ एम्पियर वाट

$$60 = 250 \times C$$

$\therefore$ बल्ब से बहनेवाली धारा $= \dfrac{60}{250} = \dfrac{6}{25}$ एम्पियर

ओह्म के नियम से प्रतिरोध $= \dfrac{\text{विभवान्तर}}{\text{धारा}}$

$$= \frac{250}{6/25}$$

$$= \frac{250 \times 25}{6}$$

$$= \frac{6250}{6} = 1041{\cdot}7 \text{ ओह्म}$$

अतः महीने का बिल $= 23{\cdot}125$ रुपये

60 वाट के बल्ब का प्रतिरोध $= 1041{\cdot}7$ ओह्म

4.7. उष्मीय प्रभाव के व्यावहारिक उपयोग

(a) **विद्युत् फ्यूज** (Fuse)—सप्लाई के प्रधान परिपथ में नीचे द्रवणांक और ऊँचे वि० प्रतिरोध का वह तार है, जो मुख्य धारा को निर्धारित मान से ऊँचा जाने के साथ ही फौरन काट देता है। स्वयं पिघल कर परिपथ तोड़ देता है।

सिद्धान्त—मान लीजिये कि फ्यूज़ तार के लिये

घनत्व	$=d$ ग्राम/घन सें० मी०
लम्बाई	$=l$ सें० मी०
अनुप्रस्थ क्षेत्र	$=A$ वर्ग सें० मी०
वि० उष्मा	$=s$ कैलारी/ग्राम/$^{\circ}C$
वि० प्रतिरोध	$=K$ ओह्म सें० मी०
द्रवणांक ($B.P.$)	$=T_B{}^{\circ}C$ वायुमंडल से ऊपर

मान लीजिये t सेकिंड तक C एम्पियर की धारा के बहने से यह तार पिघल जाता है।

तार द्वारा ली गई उष्मा $=MsT$ होती है, $T^{\circ}C$ तापवृद्धि है।

यहाँ तार की संहति $M=d\times Al$ ग्राम

$\therefore$ ली गई उष्मा $=(dAl)\ sT$ कैलारी

पिघलने के लिये ताप, द्रवणांक T_B तक बढ़ना चाहिये।

विद्युत् से उत्पन्न हुई उष्मा $=\dfrac{C^2Rt}{4\cdot2}$ कैलारी

यहाँ तार का प्रतिरोध $R=K\dfrac{l}{A}$

$\therefore$ उत्पन्न हुई उष्मा $=\dfrac{1}{4\cdot2}C^2\left(K\dfrac{l}{A}\right)t$ कैलारी

ली गई उष्मा $=$ उत्पन्न हुई उष्मा

$$dAlST=\frac{1}{4\cdot2}C^2.\ K\frac{l}{A}\ t$$

$\therefore$ तार को 1 से० में पिघलाने के लिए आवश्यक

$$C^2=4\cdot2\times A^2\frac{ds}{k}\ T$$

$$\therefore\quad C=2\cdot05A\sqrt{\frac{ds}{k}}\ \sqrt{T}$$

अतः धारा का उच्चतम मान $C_{max}=2\cdot05A\sqrt{\dfrac{d.s.}{k}}\ \sqrt{T_B}, (T=T_B).$

पिघलने के लिये तापवृद्धि $=$ द्रवणांक

घनत्व और वि० उष्मा के गुणनफल (ds) को तार के पदार्थ की विशिष्ट उष्मा धारिता (Specific Thermal Capacity) कह सकते हैं।

स्पष्ट है कि फ्यूज़ तार के पदार्थ का द्रवणांक T_B कम होना चाहिये और वि० प्रतिरोध ऊँचा। सप्लाई लाइन के प्रधान परिपथ में धारा का मान जैसे-जैसे बढ़ता जायेगा

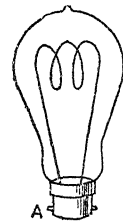
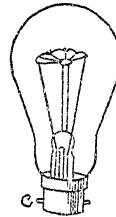
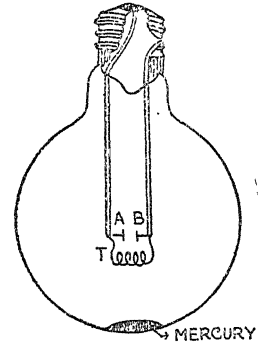
फ्यूज़ का ताप भी बढ़ता जायेगा। यदि धारा का मान अकस्मात् बढ़ जाय, तो फ्यूज़ का ताप बढ़ कर उसके द्रवणांक के बराबर या ऊँचा हो जायेगा। फ्यूज़ पिघल कर द्रवीभूत हो जायेगा और परिपथ टूट जायेगा।

$C_{max} = 2{\cdot}05 \ A \sqrt{\frac{ds}{k}} \ \sqrt{T_B}$ सम्बन्ध से स्पष्ट है कि दिये हुए पदार्थ के फ्यूज़ का अनुप्रस्थ क्षेत्र (A) परिपथ में बहनेवाली धारा के उच्चतम मान को निर्धारित करता है। क्योंकि

$$C_{max} \propto A \text{ यदि } d, s, k, T_B \text{ स्थिर रहें।}$$

यह चारों राशियाँ फ्यूज़ के पदार्थ के भौतिक गुण हैं। 10 एम्पियर की उच्चतम धारा ले जानेवाले परिपथ में लगा हुआ फ्यूज़ तार 5 एम्पियर वाले परिपथ के फ्यूज़ से $\sqrt{2}$ गुना मोटा होगा।

साधारणतया टीन अथवा टीन और सीसे की मिश्र धातु (Alloy) से फ्यूज़ तार बनाये जाते हैं।

(b) **विद्युत् बल्व (Electric Lamp)**—ये प्रायः तीन प्रकार के होते हैं :

चित्र 57 (i) (ii) (iii) (iv)

(i) कार्बन तन्तु बल्व (Carbon filament Lamp)

(ii) टंग्स्टन तन्तु बल्ब (Tungsten filament lamp)

(iii) गैस डिस्चार्ज बल्व (Gas discharge lamp)

(i) **कार्बन तन्तु बल्व**—चित्र 57 (i)—अमेरिका के प्रसिद्ध वैज्ञानिक एडिसन (Edison) ने सर्वप्रथम एक विद्युत् प्रकाशोत्पादक की रचना की। बाँस के पतले तन्तु पर कार्बन की तह जमा कर एक काँच के बल्व में लगा दिया गया। निर्वात पम्प की सहायता से अन्दर की वायु निकाल दी गई। इस तन्तु में जब विद्युत् धारा प्रवाहित की गई तो तार गर्म होकर प्रकाश देने लगा। ऐसे प्रकाशोत्पादक को कार्बन तन्तु शून्य बल्व (Carbon Filament Vacuum Lamp) कहा गया।

व्यय हुई कुल विद्युत् ऊर्जा का केवल 5 या 6 प्रतिशत भाग ही प्रकाश ऊर्जा में बदल पाता है। शेष भाग उष्मा के रूप में नष्ट हो जाता है। जैसे-जैसे तन्तु का ताप (temperature) बढ़ता जाता है प्रकाश में परिवर्तित होनेवाली ऊर्जा की प्रतिशतता (percentange) बढ़ती जाती है। बल्ब को प्रति सेकिंड दी गई विद्युत् ऊर्जा उसकी शक्ति से नापी जाती है, जो बल्ब के ऊपर वाटों में लिखी रहती है—जैसे 25 वाट, 40 वाट, 60 वाट लैम्प। बल्ब जब प्रकाश देने लगता है, तो उसकी प्रदीपन शक्ति (Illuminating Power) कैंडिल शक्ति (Candle Power) की इकाई में नापी जाती है।

उत्पन्न हुई प्रदीपन शक्ति और व्यय हुई विद्युत् शक्ति का अनुपात बल्ब की दक्षता (Efficiency) कहलाता है।

$$\text{दक्षता (Efficiency)} = \frac{\text{कैंडिल शक्ति}}{\text{वाट}}$$

कार्बन तन्तु शून्य बल्ब प्रति कैंडिल शक्ति के लिये लगभग 3 या 4 वाट विद्युत् शक्ति खर्च करता है।

बल्ब की दक्षता बढ़ाने के लिये तन्तु को ऊँचे ताप तक गर्म करना चाहिये। परन्तु जैसे ही कार्बन तन्तु का ताप $1700°C$ से ऊपर जाता है कार्बन शीघ्रता से वाष्पीभूत होकर काँच की दीवारों पर जमा हो जाता है।

अत: ऊँचे द्रवणांक वाली धातुओं के तन्तु प्रयुक्त किये जाने लगे।

(ii) **टंगस्टन (Tungsten) तन्तु शून्य बल्ब** चित्र 57 (ii)—टंग्स्टन धातु लगभग $3600°C$ पर पिघलती है। अत: इसके बने तन्तु को काफी ऊँचे ताप तक गर्म किया जा सकता है। काँच के निर्वात् (शून्य) बल्ब में टंग्स्टन धातु का एक पतला तार आगे-पीछे करके लगा दिया जाता है। अन्दर विद्युत भेजने के लिये निकिल और लोहे की मिश्र धातु (alloy) के दो मोटे तार होते हैं जिन पर तन्तु के दोनों सिरे लगे रहते हैं।

इस शून्य बल्ब में भी $2100°C$ के बाद टंग्स्टन धीरे-धीरे वाष्पीभूत होकर दीवारों पर जम जाता है और बाहर जाने वाला प्रकाश इसलिये धुंधला हो जाता है।

(iii) **टंग्सटन तन्तु गैस पूर्ण बल्ब (Tungsten Filamemnt Gas Filled Lamp)** चित्र 57 (iii)—इर्विंग लैंगम्यूर (Irving Langmuir) ने खोज की कि यदि बल्ब में से वायु निकाल दी जाय और उसके स्थान पर कोई निष्क्रिय गैस (Inert gas) जैसे आर्गन या नाइट्रोजन भर दें तो टंग्सटन तन्तु का वाष्पीकरण किसी हद तक कम हो जाता है और अब $2500°C$ तक ताप बढ़ाया जा सकता है।

इससे प्रकाशोत्पादक की दक्षता (Efficiency) लगभग दूनी हो जाती है। टंग्सटन तन्तु के शून्य बल्ब में प्रति कैंडिल शक्ति लगभग 1·2 वाट विद्युत् शक्ति खर्च

होती है। परन्तु गैस भरे विद्युत् वल्व को प्रति कैंडिल शक्ति केवल 0·6 वाट विद्युत् शक्ति की आवश्यकता है। क्योंकि यह लगभग आधा वाट शक्ति खर्च करता है, अत: गैस भरे बल्व को प्राय: अर्द्धवाट लैम्प (Half-Watt Lamp) भी कहते हैं।

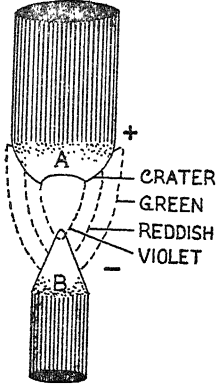
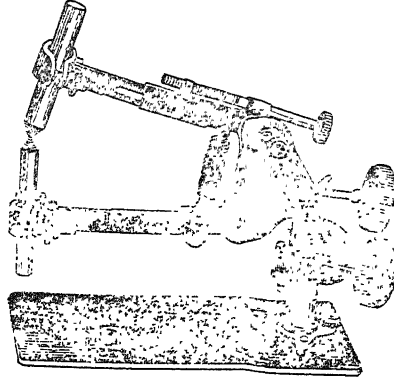
(iv) **गैस विसर्जन (Discharge) बल्व**—यह चित्र 57 (iv) में दिखाया गया है। बल्व की पेंदी में नीचे थोड़ा शुद्ध पारा रहता है। पहले तो विद्युत् टंग्सटन के तन्तु T से ही गुज़रती है जिसकी गर्मी से पारा वाष्पीभूत हो जाता है। यह एक प्रायोगिक तथ्य है कि पारे की वाष्प का प्रतिरोध बहुत ही कम होता है। अत: ऊँचे ताप पर टंग्सटन की प्लेट A और B के बीच की पारे की वाष्प में से हो कर विद्युत् गुजरने लगती है। टग्सटन के तन्तु में धारा का मान अपेक्षाकृत कम हो जाता है। अत: तन्तु का प्रकाश धीमा पड़ जाता है और बल्ब से प्राप्त होनेवाला प्रकाश पारे की वाष्प में A और B के बीच विद्युत् विसर्जन से ही उत्पन्न होता है।

परन्तु पारे की वाष्प के प्रदीपन से उत्पन्न प्रकाश के वर्णपट में केवल हरा, नीला और पीला प्रकाश ही रहता है। सूर्य के अविच्छिन्न वर्णपट के लाल सिरे का प्रकाश अनुपस्थित रहता है। यही कारण है कि इस प्रकाश में लोगों के मुँह की लालिमा दिखाई नहीं देती।

(*c*) **विद्युत् आर्क (Electric Arc)**—कार्बन (ग्रेफाइट) की दो बेलनाकार छड़ों को 40 वोल्ट से ऊँचे विभवान्तर की दिष्ट (*D.C.*) प्रधान (Mains) सप्लाई के धन और ऋण सिरों से जोड़ दीजिये। जब दोनों छड़ों के सिरे मिला दिये जाते हैं तो एक धारा बहेगी। संस्पर्श विन्दु के पास प्रतिरोध अधिकतम होगा अत: वहीं पर अधिकतम उष्मा उत्पन्न होगी। इसके फलस्वरूप कुछ कार्बन वाष्पीभूत हो जायेगा। अब यदि छड़ों को पीछे हटा कर उनके सिरों के बीच थोड़ा फासला कर दें तो भी विद्युत् प्रवाह बन्द नहीं होता। कार्बन की वाष्प अब एक चालक का काम करती है। परन्तु इसका प्रतिरोध कार्बन की छड़ से कई गुना होता है। अत: फल यह होता है कि ताप बहुत ऊँचा बढ़ जाता है।

धन छड़ सिरे से कार्बन के कण निकल निकल कर ऋण सिरे पर एकत्र हो जाते हैं और ऋण सिरे की ओर से जानेवाले इलैक्ट्रन बड़े वेग से धन सिरे पर टकराते हैं। चित्र 58 की भाँति धन छड़ में एक गर्त्त (Crater) बन जाता है और ऋण छड़ नुकीली हो जाती है। दोनों सिरों के बीच एक विद्युत् चाप (Electric arc) उत्पन्न होता है। क्रेटर के समीपवर्ती आर्क का ताप 3500°*C* तक बढ़ जाता है और ऋण सिरे पर 2500°*C* ताप रहता है। आर्क के विभिन्न भागों के प्रकाश का रंग चित्र 58 में अभिलेखित है।

लगातार प्रयोग से धन छड़ धीरे-धीरे खर्च होती जाती है और दोनों का फासला बढ़ता जाता है जिससे आर्क के बन्द हो जाने की सम्भावना रहती है। अत: दोनों छड़ों को धीरे-धीरे पास लाना पड़ता है। चित्र 59 में यह प्रबन्ध स्पष्ट दिखाया गया है।

विभिन्न पेंचों की सहायता से आर्क को ऊपर-नीचे या दायें-बायें भी चला सकते हैं और साथ ही दोनों छड़ों को भी पास ला सकते हैं।

चित्र 58

चित्र 59

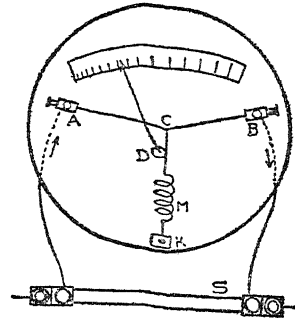
विभिन्न धातुओं की छड़ बना कर भी उनके आर्क उत्पन्न करके उनके "आर्क वर्णपट" (Arc Spectrum) का अध्ययन किया जाता है।

विभिन्न धातुएँ निकालने के लिये भट्टियों में विद्युत् आर्क का प्रयोग किया जाता है। आर्क से जितना ऊँचा ताप उत्पन्न होता है वह अन्य ईंधन को जलाने से नहीं प्राप्त हो सकता। गर्म होकर धातुएँ पिघल जाती हैं।

सिनेमा और सर्चलाइट (Search Light) में विद्युत् आर्क ही प्रयुक्त होता है।

(*d*) तप्त तार एम्पियर मापी (Hot wire Ammeter)—

सिद्धान्त—विद्युत् के तापीय प्रभाव से परिणामित उष्मीय प्रसार के आधार पर कार्य करता है।

रचना—(चित्र 60) ऊँचे लम्ब प्रसार गुणक और वि० प्रतिरोध वाला AB एक चालक तार है। इसके मध्य बिन्दु C से बँधा दृढ़ रेशम का डोरा एक बेलन (Drun) D पर दो एक बार लिपटने के बाद एक कमानी M से जुड़ा है। कमानी M उपकरण के आवरण में K पर दृढ़ता से जड़ी है। बेलन D में एक निर्देशक लगा है, जो डायल पर बने अंकित पैमाने पर घूम सकता है।

चित्र 60

S एम्पियर मापी का पार्श्व वाही (Shunt) है।

कार्य-विधि—AB में जब धारा बहती है, तो उष्मा उत्पन्न होती है। इससे तार की लम्बाई बढ़ती है और वह ढीला पड़ जाता है। कमानी M पर खिंचाव कम होने से सिकुड़ेगी और रेशम के डोरे को नीचे खींचेगी। इससे बेलन D और उससे सम्बन्धित निर्देशक दाईं ओर घूमेगा।

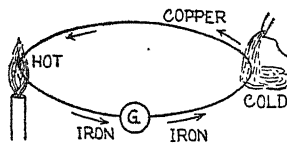
निर्देशक का विक्षेप तार में उत्पन्न हुए लम्ब प्रसार के समानुपाती होगा। परन्तु लम्ब प्रसार स्वयं उष्मा के समानुपाती है। जूल के नियमानुसार उत्पन्न हुई उष्मा धारा के वर्ग के समानुपाती है। अतः अन्त में निर्देशक का विक्षेप θ, AB में बहनेवाली धारा के वर्ग C^2 के समानुपाती है।

$$\theta \propto C^2$$

C चाहे $(+)$ या $(-)$ हो C^2 का मान समान रहेगा। अतः धारा चाहे किसी भी दिशा में बहे विक्षेप केवल एक ही दिशा में होगा। इसलिये तप्त-तार एम्पियर मापी दिष्ट (*D.C.*) अथवा प्रत्यावर्ती (*A.C.*) दोनों प्रकार की धाराओं के मापन के लिये प्रयुक्त हो सकते हैं।

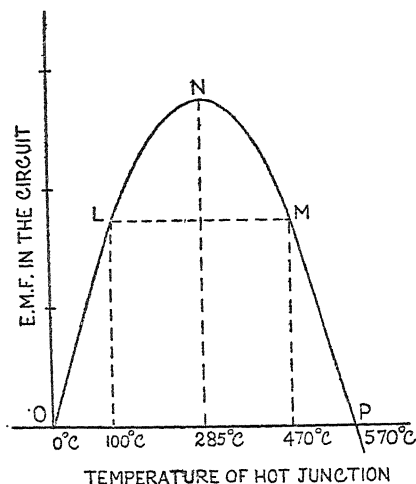
आपने देखा कि विक्षेप धारा के वर्ग के समानुपाती है। अब 0 से 1 एम्पियर तक धारा का मान बढ़ने पर मान लीजिये निर्देशक का विक्षेप x है। तो 2, 3, 4... एम्पियर की धारा के लिये विक्षेप क्रमशः $4x$, $9x$, $16x$ ...होगा।

स्पष्ट है कि डायल पर बने पैमाने के भागों की परस्पर दूरी सर्वत्र इकसार नहीं हो सकती। 0 मान से जैसे-जैसे हम आगे बढ़ते बढ़ते जायेंगे भाग उत्तरोत्तर चौड़े होते जायेंगे। अतः जब निर्देशक दो अंकित चिह्नों के बीच होगा तो बहनेवाली धारा के मान का अनुमान कठिन होगा।

4.8. **सीबेक प्रभाव (Seebeck Effect)**—रूस के वैज्ञानिक सीबेक ने 1821 ई० में यह खोज की कि यदि दो असमान धातुओं के बने पूर्ण परिपथ (Complete Circuit) में दोनों संगमों (Junctions) के ताप असमान रखे जायँ, तो परिपथ में एक वि० वा० बल उत्पन्न हो जाता है जिसके फलस्वरूप एक धारा बहने लगती है। इस प्रभाव को सीबेक प्रभाव (Seebeck Effect) कहते हैं। उत्पन्न होनेवाली धारा और वि० वा० बल को क्रमशः ताप विद्युत् धारा (Thermo Electric Current) और ताप विद्युद्वाहक बल (Thermo electro-motion force) कहते हैं। दोनों असमान धातुओं के बने युग्म को ताप युग्म (Thermo couple) का नाम दिया गया है।

चित्र 61

चित्र 61 में एक ऐसा ही ताप युग्म ताँबे (Copper) और लोहे (Iron) के तारों से बनाया है। परिपथ में एक सुग्राहक (संवेदनशील) और नीचे प्रतिरोध का धारा मापी लगाया गया है। ताप युग्म का एक संगम पिघलती हुई

वर्फ में रख कर $0°C$ पर स्थिर रखा गया है और दूसरे संगम को धीरे-धीरे गर्म किया गया है। यहाँ तक कि अन्त में एक बर्नर की लौ में सीधे रख दिया गया है। (चित्र 61)

प्रत्येक ताप पर धारा मापी के विक्षेप से संगत ताप वि० वा० बल (Thermo *e.m.f.*) की गणना करके चित्र 62 में एक ऐसा ग्राफ खींचा है जिसकी X–अक्ष पर गर्म

चित्र 62

संगम का ताप और Y–अक्ष पर उत्पन्न ताप वि० वा० बल हो। परिणामित वक्र एक परिवलय (Parabola) आता है जिसका शीर्ष ऊर्ध ऊपर है और जिसकी अक्ष Y अक्ष के समानान्तर है। इस वक्र को ताप विद्युत् वक्र (Thermo Electric Curve) कहते हैं।

पहले तो जब गर्म संगम का ताप धीरे-धीरे बढ़ाया जाता है, तो गर्म संगम पर ताँबे से लोहे की ओर धारा बहती है। ताप बढ़ाने पर धारा और इसलिये वि० वा० ब० भी बढ़ता जाता है। जब गर्म संगम का ताप $285°C$ हो जाता है, तो उस वि० वा० बल का मान अधिकतम होता है। इससे आगे ताप बढ़ाने पर वि० वा० बल घटने लगता है और घटते-घटते $570°C$ पर शून्य हो जाता है। धारा बन्द हो जाती है। परन्तु यदि इससे आगे भी ताप बढ़ाया जाय, तो अब फिर धारा बहने लगती है, परन्तु विपरीत दिशा में। गर्म संगम पर अब धारा की दिशा लोहे से ताँबे की ओर हो जाती है। इस बिन्दु (P) पर वक्र X अक्ष के नीचे Y अक्ष की ऋणात्मक दिशा में चलने लगा है (चित्र 62)। यहाँ पर वि० वा० बल ऋणात्मक (विपरीत) हो गया है।

जिस ताप पर वि० वा० बल की दिशा बदलने लगती है उसे उस ताप-युग्म का उत्क्रमण का ताप (Temperature of Inversion) या केवल उत्क्रम बिन्दु (Inversion

Point) कहते हैं। बिन्दु N वाला ताप जिससे आगे वि० वा० बल घटने लगता है, युग्म विशेष का उदासीन ताप (Neutral Temperature) या उदासीन विन्दु (Neutral Point) कहलाता है। लोह-ताम्र युग्म के लिये (चित्र 62) उदासीन ताप 275°C और उत्क्रम ताप 570°C है।

किसी युग्म विशेष के लिये उदासीन ताप (Neutral Temperature) स्थिर रहता है, परन्तु उत्क्रम ताप ठंढे संगम के ताप के साथ बदलता है। परन्तु सदैव उत्क्रम ताप उदासीन ताप से इतना ही ऊँचा रहता है जितना उदासीन ताप ठंडे संगम के ताप से ऊपर है। अर्थात् उदासीन बिन्दु उत्क्रम बिन्दु और ठंडे संगम के ताप के ठीक बीच में स्थित रहता है। चित्र 62 की भाँति यदि लोह-ताम्र युग्म के ठंडे संगम का ताप 100°C कर दें, तो उत्क्रम विन्दु भी 100°C नीचे खिसक कर 470°C पर आजायेगा।

यदि ठंडे संगम का ताप T_1°C और उदासीन ताप व उत्क्रम ताप क्रमशः T°C और T_2°C हैं। तो,

$$T - T_1 = T_2 - T$$

या, $$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

सीबेक (Seebeck) ने बहुत सी धातुओं के तार ले कर विभिन्न युग्म बना कर प्रयोग दुहराया। सदैव एक ही प्रकृति का प्रभाव देखा गया। यह बात अवश्य थी कि यदि विभिन्न धातुओं से बने युग्मों के संगमों में समान ताप अन्तर रखा जाय, तो वि० वा० बल की दिशा और परिमाण दोनों ही उस युग्म विशेष पर निर्भर करेंगे। इन प्रयोगों के आधार पर उन्होंने बहुत सी धातुओं की एक तालिका बनाई जिसमें किन्हीं भी दो धातुओं के युग्म बनाने पर गर्म संगम पर ताप विद्युत् धारा तालिका में पहले आनेवाली धातु से बाद में आनेवाली धातु की ओर बहेगी। इस प्रकार की "सीबेक श्रेणी" (Seebeck Series) की कुछ धातुओं का क्रम इस प्रकार है—

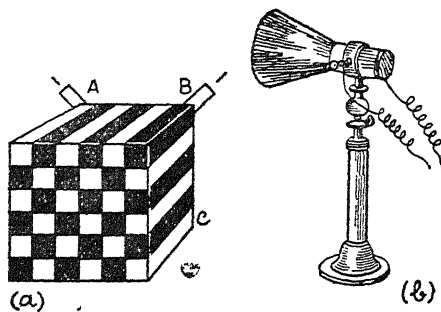
1. विस्मथ, 2. निकल, 3. कोबाल्ट, 4. प्लेटीनम, 5. ताँबा, 6. सीसा 7. सोना, 8. चाँदी, 9. लोहा, 10. एन्टीमनी।

किसी ताप युग्म के बीच यदि कोई तीसरी धातु का टुकड़ा लगा दें या धारामापी आदि कोई यंत्र जोड़ दें, तो भी सीबेक प्रभाव में कोई प्रभाव नहीं पड़ता।

9·4. ताप विद्युत् पुंज (Thermopile)—

सिद्धान्त—सीबेक श्रेणी में विस्मथ और एन्टीमनी बहुत दूर स्थित हैं। अतः इन दोनों धातुओं के बने ताप-युग्म में सीबेक प्रभाव बहुत प्रशंसनीय होगा। उत्पन्न हुए ताप वि० वा० बल का मान काफी ऊचा होगा। 0°C और 100°C के ताप अन्तर के लिये विस्मथ एन्टीमनी युग्म में लगभग 7×10^{-6} वोल्ट वि० वा० बल उत्पन्न होता है, जो गर्म संगम पर विस्मथ से एन्टीमनी की ओर कार्य करता है। बहुत से विस्मथ एन्टीमनी

ताप युग्म (Thermo couple) श्रेणीक्रम में जोड़ देने से परिणामित कुल प्रभावित वि० वा० बल बढ़ जाता है। इसी सिद्धान्त पर "ताप विद्युत् पुंज" (Thermopile) की रचना की गई है।

रचना—चित्र 63 (*a*) में विस्मथ और एन्टीमनी के अट्ठारह ताप-युग्मों से मिल कर बना ताप विद्युत् पुंज दिखाया गया है। प्रतिरोध कम करने के लिये तार की बजाय छड़ें प्रयोग में लाई गई हैं। विस्मथ की छड़ें काली खिंची हैं और एन्टीमनी की छड़ें खाली हैं। प्रत्येक छड़ को पृथक्कृत करने के लिये बीच में अभ्रक की तह दे दी जाती है। समस्त ताप युग्म परस्पर श्रेणीक्रम में जुड़े हैं। प्रथम युग्म की विस्मथ और अन्तिम युग्म की एन्टीमनी की छड़ में एक-एक संयोजक पेंच (Binding Screw) लगा दिया गया है।

चित्र 63

इस प्रकार के युग्मों के गट्ठर को पीतल के एक शंक्वाकार परावर्तक (Reflector) के शीर्ष के समीप लगा दिया जाता है। जिस ओर संयोजक पेंच लगे हैं वह मुख पृष्ठ पीछे की ओर रहता है। प्रयोग करते समय इन्हीं पेंचों में धारा मापी जोड़ा जाता है। परावर्तक के अन्दर की ओर वाला भाग (युग्म का) काला कर दिया जाता है जिससे आपतित उष्मा का पूर्ण शोषण हो सके।

कार्य-विधि—संयोजक पेंचों के बीच धारामापी जोड़ कर परावर्तक का मुँह आपतित उष्मा की ओर कर दीजिये। अन्दर वाले संगम गर्म होंगे और धारामापी में ताप विद्युत् उत्पन्न होगी। विभिन्न ताप वाले ताप स्रोतों की ओर परावर्तक का मुँह करके संगत विक्षेप की सहायता से धारामापी का कैलीबरेशन वक्र (Calibration Curve) बना लीजिये। अब इस वक्र की सहायता से किसी भी अज्ञात स्रोत का ताप ज्ञात कर सकते हैं।

इसी प्रकार का "कैलीबरेशन वक्र" आपतित उष्मा की कुल मात्रा और धारामापी विक्षेप से भी बनता है। उस वक्र की सहायता से आप ज्ञात कर सकते हैं कि सूर्य से प्रति सेकिंड कितनी उष्मा 1 वर्ग सें० मी० क्षेत्रफल पर आपतित होती है।

4.10. **पेल्टियर प्रभाव (Peltier Effect)**—सन् 1834 में पैल्टियर ने सीबेक प्रभाव के विलोम की खोज की। उन्होंने प्रयोगों द्वारा यह स्थापित किया कि दो असमान धातुओं के वने युग्म में यदि विद्युत् धारा प्रवाहित की जाय, तो एक संगम गर्म हो जाता है और दूसरा ठंडा। परन्तु यदि धारा की दिशा बदल दी जाय, तो पहले गर्म होनेवाले संगम पर उष्मा का शोषण होने लगेगा और दूसरे सिरे पर उष्मा मुक्त होगी। जिससे पहला सिरा ठंडा और दूसरा गर्म हो जायेगा।

एक ताप-युग्म में धारा प्रवाह से संगमों में उत्पन्न हुए तापान्तर की घटना को पैल्टियर प्रभाव कहते हैं। जैसा कि अभी देखा यह प्रभाव उत्क्रमणीय (Reversible) है।

पैल्टियर ने आगे बताया कि पैल्टियर प्रभाव में अर्थात् बाहरी धारा प्रवाह से जो संगम ठंडा होता है, सीबेक प्रभाव में यदि उसी को गर्म संगम रखा जाय, तो ताप विद्युत् धारा की दिशा वही होगी।

विस्मथ एन्टीमनी युग्म के लिये सीबेक प्रभाव में गर्म संगम पर ताप विद्युत् धारा विस्मथ से एन्टीमनी की ओर बहती है। पैल्टियर प्रभाव के लिये जिस संगम पर बाहरी धारा विस्मथ से एन्टीमनी की ओर जायेगी उष्मा का शोषण होगा और वह संगम ठंडा हो जायेगा।

पेल्टियर और जूल प्रभाव का अन्तर—

(i) जूल प्रभाव चालक के प्रतिरोध के कारण होता है। इसमें उत्पन्न हुई उष्मा धारा के वर्ग के समानुपाती होती है। इसमें उष्मा का शोषण तो कहीं होता ही नहीं। सदैव उष्मा उत्पन्न होती है। परन्तु पैल्टियर प्रभाव में उष्मा का शोषण और उत्पादन समतुल्य मात्रा में होता है। यह उष्मा धारा के मान के समानुपाती होती है।

(ii) जूल का प्रभाव धारा के वर्ग के समानुपाती होने से धारा की दिशा से प्रभावित नहीं होता। परन्तु पैल्टियर प्रभाव में धारा की दिशा वदलने से प्रभाव भी बदल जाता है। उष्मा शोषण और उत्पादन के स्थान भी परस्पर बदल जाते हैं।

4.11 **टॉम्सन प्रभाव (Thomson Effect)**—

लौर्ड कैल्विन ने जो कि सन् 1866 ई० में इस खोज के समय सर विलियम टॉम्सन थे प्रयोगों द्वारा और सैद्धान्तिक गणना से सिद्ध किया कि यदि ऐसे चालक में धारा प्रवाहित की जाय जिसकी लम्बाई में ताप लगातार बदलता जाय, तो धारा की दिशा के अनुसार चालक में उष्मा का शोषण या उत्पादन होगा। यह प्रभाव उत्क्रमणीय (Reversible) है। यदि धारा की एक दिशा में उष्मा का शोषण होता है, तो विपरीत दिशा में धारा बहाने से उष्मा उत्पन्न होगी।

ठंडे सिरे गर्म की ओर धारा बहाने से शोषण और गर्म से ठंडे सिरे की ओर धारा बहाने से यदि उष्मा का उत्पादन हो, तो इस प्रभाव को **धनात्मक टॉम्सन प्रभाव**

(Positive Thomson Effect) कहते हैं। ताँबा, चाँदी, एन्टीमनी, कैडमियम आदि में धनात्मक प्रभाव होता है।

ऋणात्मक टॉम्सन प्रभाव में गर्म सिरे से ठंडे सिरे की ओर धारा बहाने से उष्मा का शोषण होता है और इसके विपरीत दिशा में उत्पादन जैसे, लोहा, विस्मथ, प्लेटीनम आदि से।

सारांश

किसी चालक में उत्पन्न हुई उष्मा धारा के वर्ग, चालक के प्रतिरोध और प्रवाह के समय के समानुपाती होती है।

विद्युत् शक्ति = वोल्ट × एम्पियर

$$\text{विद्युत् ऊर्जा की } B.O.T. \text{ यूनिट} = \frac{\text{वोल्ट} \times \text{एम्पियर} \times \text{घंटे}}{1000}$$

= किलोवाट आवर

सिबेक प्रभाव—दो असमान धातुओं से बने पूर्ण परिपथ में यदि एक संगम को गर्म और दूसरे को ठंडा करें तो ताप विद्युत् धारा उत्पन्न होती है।

पैल्टियर प्रभाव—सीबेक प्रभाव के विपरीत यदि इस ताप युग्म में बाहरी धारा प्रवाहित करें, तो एक संगम गर्म और दूसरा ठंडा हो जाता है।

टॉम्सन प्रभाव—यदि ऐसे चालक में धारा बहायें जिसकी लम्बाई में ताप बदलता है, तो धारा की दिशा के अनुसार उष्मा का शोषण या उत्पादन होगा।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. E स्थायी विभवान्तर पर C एम्पियर की धारा t से० में बहने से कितनी उष्मा उत्पन्न करेगी?

   इस उष्मा उत्पत्ति का इलैक्ट्रन सिद्धान्त से समर्थन कीजिये।
2. जूल के नियमों की व्याख्या कीजिये। इनके सत्यापन के लिय प्रयोग वर्णन कीजिये।
3. **टिप्पणी लिखिये**—
   (i) विद्युत् फ्यूज़, (ii) विद्युत् बल्ब, (iii) तप्त तार एम्पियर मापी (iv) $B.O.T.$ इकाई।
4. सीबेक प्रभाव को पूर्णतया समझाइये। उदासीन ताप और उत्क्रम ताप से आप क्या समझते हैं?
5. ताप विद्युत् पुंज (Thermopile) पर एक टिप्पणी लिखिये।
6. लोहा करने की एक मशीन का भार 3000 ग्राम है। 220 वोल्ट की सप्लाई से 2.25 एम्पियर की धारा बह रही है। $200^\circ C$ तक ताप बढ़ने में कितना समय लगेगा यदि प्रारम्भिक ताप $20^\circ C$ हो?

   वि० उष्मा $= 0{\cdot}113$ कैलारी/ग्राम/$^\circ C$

   उष्मा का यांत्रिक तुल्यांक $J = 4{\cdot}2 \times 10^7$ अर्ग/कैलारी

   (उत्तर—8 मि० 38 से०**)**

7. 40 विद्यार्थियों के छात्रावास में 48 बल्ब हैं जिनमें से प्रत्येक पर 40 वाट, 220 वोल्ट अंकित हैं। सब बल्ब औसतन् 5 घंटे प्रतिदिन जलते हैं। 30 दिन के महीने में 31 नये पैसे प्रति यूनिट की दर से कितने रुपये का बिल बनेगा? यदि बिजली का खर्चा सब छात्र ही दें, तो प्रत्येक पर क्या पड़ेगा?

8. एक ही पदार्थ के बराबर लम्बे तार श्रेणीक्रम में जुड़े हैं। यदि उनके व्यास 1 : 2 के अनुपात में हैं, तो उनमें उत्पन्न हुई उष्मा की निष्पत्ति निकालिये जब कि एक स्थायी धारा प्रवाहित की जाती है।

   यदि इन्हीं तारों को समानान्तर में जोड़ दें, तो फिर उत्पन्न हुई उष्माओं में क्या अनुपात होगा? (**उत्तर**—श्रेणीक्रम 2 : 1, समानान्तर 1:2)

9. उष्मा-विद्युतीय (thermo-electric) धारा किसे कहते हैं? इस प्रकार की धारा को तुम ऊर्जा के अविनाशकत्व के सिद्धान्त द्वारा किस प्रकार समझाओगे?

10. संतुलित व्हीट्स्टन सेतु की चारों भुजाओं में उत्पन्न उष्माओं की तुलना करो, जब कि भुजाओं के प्रतिरोधों के मान क्रमशः 100, 10, 300 और 30 हैं। (30 : 3 : : 10 : 1)

11. किसी गाँव के लिए 200 एम्पियर धारा चाहिए। यह एक डायनमो से जो दूर कस्बे में लगा हुआ है, सप्लाई की जाती है। यदि डायनमो 220 वोल्ट का विभवान्तर उत्पन्न करता है, तो (i) कस्बे से गाँव तक leads का प्रतिरोध, (ii) गाँव में 10 घंटे में इस्तेमाल हुई *B.O.T.* इकाइयाँ, (iii) मेन्स में व्यर्थ गई *B.O.T.* इकाइयाँ ज्ञात करो। (·5 ओह्म, 80 यूनिट, 8 यूनिट)

12. दो परिपथों *A* और *B* में, जो समानान्तर में संबद्ध हैं, एक बैटरी, विद्युत् धारा भेज रही है। *A* में केवल एक ताँबे का वोल्टामीटर है, जिसका प्रतिरोध ·5 ओह्म है, और *B* में केवल 1 मीटर लम्बा तार है, जिसका परिच्छेद ·2 वर्ग मि० मी० है, और जिसकी प्रतिरोधकता (Resistivity) $1{\cdot}6\times10^{-5}$ ohms cms. है। जब तक ·4 ग्राम ताँबा चढ़ता है, तब तक *B* में 30 कैलारी उष्मा उत्पन्न हो जाती है। बताओ विद्युत् कितने समय तक चालू थी? ($e = {\cdot}000329, j = 4{\cdot}2\times10^{7}$ अर्ग प्रति कैलारी) (1 घंटा, 1 मि० 6 सेकंड)

13. धारा वाहक तार किस प्रकार उस तार से भिन्न होता है, जिसमें धारा प्रवाहित नहीं होती?

    इन प्रभावों से धारा की माप किस प्रकार की जा सकती है?

अध्याय 5

विद्युत्-धारा के रासायनिक प्रभाव

(Chemical Effects of Current)

5.1. **विद्युद्विश्लेषण (Electrolysis)**—ठोसों की भाँति द्रव भी दो प्रकार के होते हैं—(i) विद्युत् अचालक (non-conductor) जैसे, तेल, कार्बनिक यौगिक (organic compounds), अल्कोहल और परिस्रवित शुद्ध जल (distilled pure water) आदि।

(ii) **विद्युत् चालक (Conductors)**—जिनमें हो कर विद्युत् जा सकती है। चालक द्रव भी दो प्रकार के होते हैं—

(a) वे जो विद्युत् प्रवाह से विघटित (decomposed) नहीं होते जैसे, पारा और पिघली हुई धातुएँ।

(b) वे जो विद्युत् प्रवाह से विघटित हो जाते हैं—जैसे तेज़ लवणों के घोल, हल्के अम्ल और क्षार तथा कुछ पिघले हुए यौगिक।

विद्युत् प्रवाह से विघटित होने की क्रिया को "विद्युद्विश्लेषण" (Electrolysis) और विघटित होने वाले द्रवों को "विद्युद्विश्लेष्य" (Electrolyte) कहते हैं।

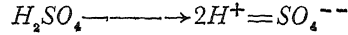
शुद्ध परिस्रित जल विद्युत् अचालक है। परन्तु जब इसमें कोई धातु लवण, अम्ल, या क्षार घोल दिया जाता है, तो विद्युत् चालन सुगम हो जाता है। पानी में घुलते ही घुलित (dissolved) यौगिक दो भागों में विभाजित हो जाता है। उनमें से एक धनावेशित (Positively charged) और दूसरा ऋणावेशित (Negatively charged)।

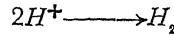
इस क्रिया को "आयनिक पृथकीकरण" (Ionic dissociation) और विघटित भागों को **आयन** (Ion) कहते हैं। दो धातु की प्लेट इस विद्युद्विश्लेष्य में डाल कर उनके बीच विभवान्तर उत्पन्न करने से आवेशित आयन अपने से विपरीत आवेशवाली प्लेट की ओर गतिमान होते हैं। विद्युद्विश्लेष्य को धारण करनेवाले बर्तन को "वोल्टामीटर" (Voltameter) और धातु की छड़ों को "विद्युद्वार" (Electrodes) कहते हैं। जिस छड़ से विद्युत् प्रवेश करती है उसे **धनाग्र** (Positive electrode) या "एनोड" (anode) कहते हैं और जिससे बाहर निकलती है उसे **ऋणाग्र** (Negative Electrode) या कैथोड (Cathode)। **एनोड** की ओर चलनेवाले ऋणावेशित आयन को एनायन (anion) और **कैथोड** की ओर चलनेवाले धनावेशित आयन को "कैटायन" (Cation) कहते हैं।

5.2. **जल वोल्टा मीटर (Water Voltameter)**—

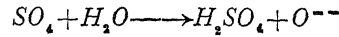
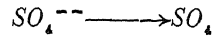
सिद्धान्त—शुद्ध पानी म थोड़ा गन्धकाम्ल मिला कर दो प्लेटीनम के विद्युद्वारों (Electrodes) की सहायता से विद्युत् प्रवाह कीजिये ।

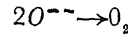
पानी में घुलते ही H_2SO_4 दो आयनों में विघटित हो जायेगा—

$$H_2SO_4 \longrightarrow 2H^+ = SO_4^{--}$$

विद्युत् प्रवाह से धनावेशित हाइड्रोजन आयन (H^+) ऋणाग्र (Negative eleectrode) पर जाकर निरावेशित हो जायेंगे और दो परमाणुओं से साधारण हाइड्रोजन अणु बन कर मुक्त होंगे ।

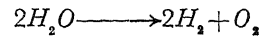
$$2H^+ \longrightarrow H_2$$

ऋणावेशित सल्फायन (SO_4^{--}) धनाग्र को अपना आवेश देने के बाद समीपवर्ती जल से रासायनिक क्रिया करेंगे ।

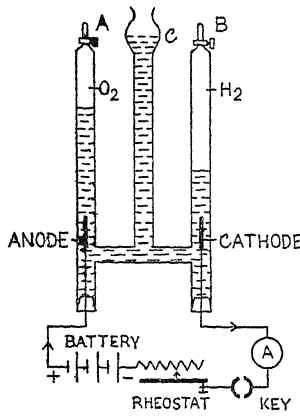
$$SO_4^{--} \longrightarrow SO_4$$

$$SO_4 + H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + O^{--}$$

आक्सीजन के दो परमाणु मिल कर एक अणु बनायेंगे ।

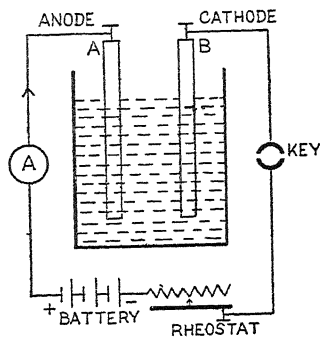
$$2O^{--} \rightarrow 0_2$$

(*a*) इस प्रकार अम्लीय जल (acidulated water) में धारा प्रवाह जारी रखने से ऋणाग्र (Cathode) पर हाइड्रोजन गैस और धनाग्र (Anode) पर आक्सीजन गैस का प्रजनन होता रहेगा । समस्त रासायनिक क्रियाओं का सम्मिलित परिणाम जल का विद्युद्विश्लेषण है जिससे H_2O अणु हाइड्रोजन (H) और आक्सीजन (O) में विभाजित हो जाता है ।

चित्र 64

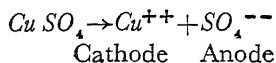
$$2H_2O \longrightarrow 2H_2 + O_2$$

गन्धकाम्ल H_2SO_4 तो केवल मध्यवर्ती क्रियाओं में भाग लेता है । उसकी मात्रा सदैव स्थिर रहती है ।

कार्यविधि—शीशे की एक नली चित्र की भांति लीजिये *A,B,C* तीन भुजायें हैं । एक क्षैतिज नली तीनों भुजाओं को मिलाती हैं । *A* और *B* में लगी काँच की डाटों में एक-एक प्लेटीनम का इलैक्ट्रोड (Electrode) लगा है । तीनों भुजाओं में अम्लीय जल भर कर चित्र की भाँति परिपथ जोड़ कर एक बैटरी से नियंत्रित धारा बहाइये ।

आप देखेंगे कि *A* और *B* में लगे विद्युद्वारों (Electrodes) से गैस के बुलबुले उठ कर ऊपर इकट्ठे होते जाते हैं । *C* में पानी चढ़ता जाता है और *A* व *B* में गैसों के दबाव के कारण गिरता जाता है ।

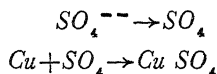
परीक्षण करने से ज्ञात होगा कि "कैथोड" (ऋणाग्र B) पर एकत्रित हाइड्रोजन "एनोड" (धनाग्र A) आक्सीजन गैस से आयतन में दो गुनी है।

(*b*) **नीले थोथे का विद्युत् विश्लेषण**—ताँबे के एक बर्तन में नीलेथोथे का घोल लीजिये। उसमें ताँबे की दो प्लेट A और B डुबा दीजिये। चित्र की भाँति विद्युत् परिपथ बना कर एक नियन्त्रित धारा वहाइये। कुछ समय बाद आप देखेंगे कि ऋणाग्र (Cathode) पर शुद्ध तांबे की तह जमती जाती है और धनाग्र (Anode) से कुछ ताँबा घोल में चला गया है।

चित्र 65

क्रिया—घुलते ही $Cu\,SO_4$ ताम्र धनायन (Cu^{++}) और ऋणावेशित सल्फायन (SO_4^{--}) में टूट जाता है—

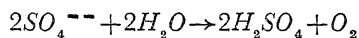
$$Cu\,SO_4 \rightarrow \underset{\text{Cathode}}{Cu^{++}} + \underset{\text{Anode}}{SO_4^{--}}$$

Cu^{++} कैथोड पर निरावेशित होने के बाद जमा हो जाता है। परन्तु SO_4^{--} अपना आवेश खोने के बाद धनाग्र के साथ रासायनिक क्रिया करता है—

$$SO_4^{--} \rightarrow SO_4$$

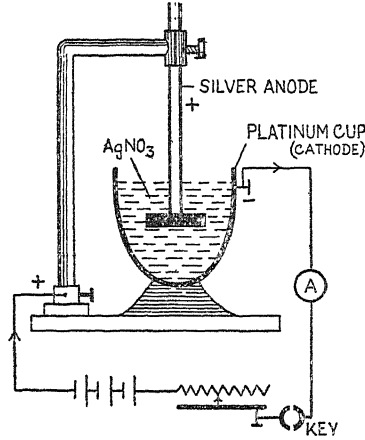
$$Cu + SO_4 \rightarrow Cu\,SO_4$$

इस प्रकार धारा प्रवाह जारी रखने से ऋणाग्र (Cathode) पर लगातार ताँबे की तह जमती जाती है और उतना ही ताँबा धनाग्र से घोल में घुलता जाता है। घोल में $Cu\,SO_4$ की मात्रा स्थिर रहती है।

इस क्रिया का उपयोग अशुद्ध ताम्र के शुद्धीकरण में होता है।

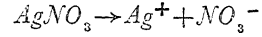
ताँबे की बजाय यदि प्लेटीनम के विद्युद्वार (Electrodes) लिये जायँ तो ऋणाग्र पर तो पहली ही भाँति तँबे की तह जमती रहेगी, परन्तु धनाग्र पर (SO_4^{--}) अपना आवेश खोने के बाद इलैक्ट्रोड से कोई क्रिया नहीं कर सकता। अतः समीपवर्ती पानी के साथ रासायनिक क्रिया से आक्सीजन उत्पन्न होगी।

$$2SO_4^{--} + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 + O_2$$

नीलेथोथे की मात्रा घटती जायेगी और गन्धकाम्ल उत्पन्न होता रहेगा।

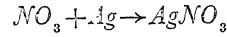
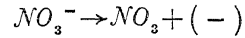
(*c*) **सिलवर नाइट्रेट ($AgNO_3$) का विद्युद्विश्लेषण**—एक प्लेटीनम के प्याले में $AgNO_3$ का 10% घोल लेते हैं जिसमें एक चाँदी का धनाग्र (Positive Electrode) डूबा है। प्याला स्वयं ऋणाग्र (Cathode) रहता है।

प्याले में लगे संयोजक पेंच में बैटरी का ऋण सिरा जोड़ कर चित्र की भाँति नियंत्रित धारा बहने दीजिये।

चित्र 66

क्रिया—घुलने पर $AgNO_3$ धनावेशित सिलवर आयन (Ag^+) और ऋणावेशित (NO_3^-) आयन में विभक्त हो जाती है।

$$AgNO_3 \rightarrow Ag^+ + NO_3^-$$

धारा बहाने से (Ag^+) आयन कैथोड (प्लेटीनम की प्याली) पर जा कर निरावेशित होने के बाद जमा हो जाते हैं। (NO_3^-) आयन निरावेशित होकर चाँदी के धनाग्र से क्रिया करके पुनः $AgNO_3$ बनाते हैं—

$$NO_3^- \rightarrow NO_3 + (-)$$

$$NO_3 + Ag \rightarrow AgNO_3$$

इस प्रकार $AgNO_3$ की मात्रा स्थिर रहती है।

5. 3. विद्युद्विश्लेषण के फैरेडे के नियम—

इस प्रकार के अनेक वोल्टा मीटरों में विभिन्न विद्युद्विश्लेष्यों पर प्रयोग करके 1833 ई० में फैरेडे ने निम्न दो नियम दिये—

(i) किसी इलैक्ट्रोड पर मुक्त हुए आयन की संहति विद्युद्विश्लेष्य (electrolyte) में से गुज़रे हुए कुल विद्युत् आवेश (electric charge) की समानुपाती होती है।

(ii) विभिन्न वोल्टा मीटरों के इलैक्ट्रोडों पर एक ही धारा से मुक्त हुए विभिन्न आयनों की संहति उनके रासायनिक तुल्यांकों की समानुपाती होती है।

(i) **प्रथम नियम**—मान लीजिये, किसी वोल्टा मीटर में C एम्पियर की धारा t सैकिंड तक बहने से किसी आयन के m ग्राम मुक्त करती है। यदि इस समय में प्रवाहित कुल आवेश Q कूलम्ब हो, तो फैरेडे के प्रथम नियमानुसार,

$$m \propto Q$$

$$\propto Ct \qquad (\because Q = Ct)$$

या, $$m = ZCt \ldots\ldots\ldots\ldots (i)$$

यहाँ Z एक समानुपाती स्थिरांक है। इसे उस आयन विशेष का विद्युत् रासायनिक तुल्यांक (Electro Chemical Equivalent) या वि० रा० तु० (*e.c.e.*) कहते हैं।

समीकरण (i) में यदि $C=1$, $t=1$ रख दें, तो, $m=Z$ हो जाता है।

अतः वि० र० तु० एक एम्पियर धारा से 1 सेकिंड में आयन विशेष की मुक्त हुई संहति के बराबर होती है। क्योंकि 1 एम्पियर की धारा से 1 से० में 1 कूलम्ब आवेश

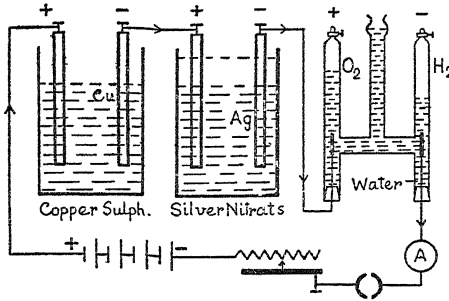
प्रवाहित होता है, अतः वि० र० तु० 1 कूलम्ब विद्युत् आवेश द्वारा मुक्त की गई आयन की संहति के बराबर भी होता है।

इकाई—समीकरण (i) में विभिन्न राशियों की इकाइयाँ रखिये,

$$\text{ग्राम} = Z \frac{\text{कूलम्ब}}{\text{से०}} \times \text{से०}$$

∴ वि० रा० तु० Z की इकाई ग्राम/कूलम्ब हुई।

फैरेडे के प्रथम नियम को हम इस प्रकार भी निवेदन कर सकते हैं—विद्युद्विश्लेषण में किसी आयन की मुक्त हुई संहति आयन विशेष के वि० र० तु०, धारा की तीव्रता और धारा प्रवाह समय के गुणनफल के बराबर होती है।

(*ii*) **द्वितीय नियम**—चित्र 67 की भाँति ताम्र वोल्टा मीटर, सिल्वर वोल्टा मीटर और जल वोल्टा मीटर को श्रेणीक्रम में जोड़ कर कुछ समय तक स्थायी नियन्त्रित

चित्र 67

धारा बहाइये। परिणामित विद्युद्विश्लेषण से मुक्त हुए Cu, Ag, O_2, H_2 आयनों की संहति मान लीजिये क्रम से m_{Cu}, m_{Ag}, m_o, और m_H ग्राम हैं। यदि इनके संगत रासायनिक तुल्यांक (Chemical equivalents) क्रमशः W_{cu}, W_{Ag}, W_o, और W_H हों, तो, फैरेडे के द्वितीय नियम के अनुसार,

$$\frac{m_{Cu}}{W_{Cu}} = \frac{m_{Ag}}{W_{Ag}} = \frac{m_0}{W_0} = \frac{m_H}{W_H} \text{ होगा।}$$

सामान्यतः यदि W रासायनिक तुल्यांक वाले आयन की मुक्त हुई संहति m हो, तो $m \propto W$ यदि मुक्त करनेवाला आवेश Ct स्थिर रहे।

यहाँ समस्त वोल्टा मीटरों में t से० तक बहनेवाली स्थायी धारा C एम्पियर है। परन्तु फैरेडे के प्रथम नियमानुसार समीकरण (i) से, $m \propto Z$ यदि Ct स्थिर रहे। अतः दोनों को मिलाने से,

$$Z \propto W$$

$$\text{या } W/Z = F \text{ स्थिरांक}$$

समानुपाती स्थिरांक F बहुत ही महत्वपूर्ण है। यह विद्युत् आवेश की उस मात्रा के बराबर है, जो किसी भी आयन की 1 ग्राम तुल्यांक (रासायनिक तुल्यांक ग्रामों में) संहति मुक्त कर सकता है। इस स्थिरांक को फैरेडे (Faraday) कहते हैं।

प्रथम नियम के समीकरण,

$$m = ZCt$$

में यदि आप m की जगह W (ग्राम तुल्यांक) रख दें। तो, $W/Z = Ct$
आवेश की वह मात्रा जो W ग्राम आयन मुक्त कर सके = फैरेडे।

अब Ag का रासायनिक तुल्यांक = 108

∴ Ag का ग्राम तुल्यांक = 108 ग्राम

परन्तु Ag का वि० र० तु० = ·001118 ग्राम/कूलम्ब

अर्थात् ·00118 ग्राम चाँदी 1 कूलम्ब आवेश से युक्त होती है।

अतः 108 ग्राम चाँदी $\frac{108 \text{ ग्राम}}{\cdot 001118 \text{ ग्राम/कूलम्ब}} = 96500$ कूलम्ब मुक्त करेंगे।

इसप्रकार Cu का ग्राम तुल्यांक 31·5 ग्राम है

और वि० र० तु० ·000329 ग्राम/कूलम्ब है

अतः Cu के लिये F फैरेडे का मान $= \frac{31 \cdot 75 \text{ ग्राम}}{0 \cdot 000329 \text{ ग्राम/कूलम्ब}}$

$= 96500$ कूलम्ब

इस प्रकार समस्त आयनों के एक-एक ग्राम तुल्यांक मुक्त करने के लिये 96500 कूलम्ब आवश्यक है। अतः फैरेडे का मान 96500 कूलम्ब हुआ।

अब W/Z = स्थिरांक

से स्पष्ट है कि यदि Z_{Cu}, Z_{Ag}, Z_O, Z_H क्रमशः Cu, Ag, O_2, और H_2 के वि० र० तु० हो, तो,

$$\frac{W_{Cu}}{Z_{Cu}} = \frac{W_{Ag}}{Z_{Ag}} = \frac{W_O}{Z_O} = \frac{W_H}{Z_H} = F$$

इस प्रकार यदि एक आयन का वि० र० तु० ज्ञात हो, तो रासायनिक तुल्यांकों के ज्ञान से अन्य आयनों के वि० र० तु० निकाले जा सकते हैं। जैसे Ag का वि० र० तु० 0·00118 ग्राम/ कूलम्ब है। और Ag का रासायनिक तुल्यांक 108 व Cu का रा० तु० 31·5 है, तो,

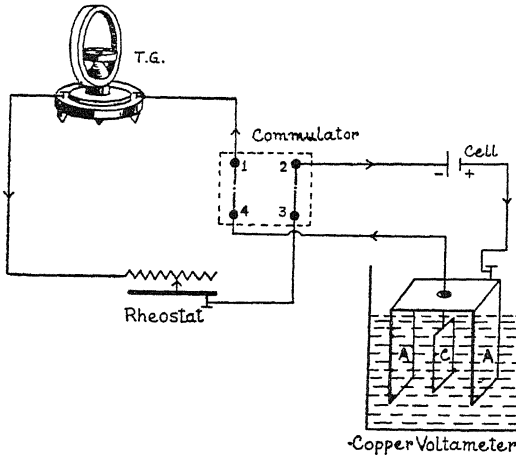
$$\frac{W_{Ag}}{Z_{Ag}} = \frac{W_{Cu}}{Z_{Cu}}$$

$$\therefore \; Z_{Cu} = Z_{Ag} \frac{W_{Cu}}{W_{Ag}}$$

$$= \cdot 00118 \times \frac{31.75}{108}$$

$$= \cdot 000329 \text{ ग्राम/कूलम्ब}$$

5.4. स्पर्शज्या धारामापी का परिवर्तन गुणक निकालना—

सिद्धान्त—ज्ञात समय में ताम्र वोल्टा मीटर में स्थायी विद्युत् धारा प्रवाह से कैथोड पर एकत्रित ताम्र (Cu) की संहति से धारा की प्रबलता निकाल कर और धारा मापी में संगत विक्षेप पढ़ कर परिवर्तन गुणक की गणना की जाती है।

चित्र 68

कार्य-विधि—विद्युत् परिपथ चित्र 68 में दिया है। दिक्परिवर्तक (Commutator) के आमने-सामने के दो संयोजक पेंचों (1, 3) के बीच स्पर्शज्या धारामापी ($T, G.$) को, परिवर्तनशील प्रतिरोध (Rheostat) में हो कर जोड़ दीजिये। दिक्-परिवर्तक के शेष दो पेंचों (2, 4) में से एक (2) से संचायक सैल का ऋणाग्र और दूसरे (4) से ताम्र वोल्टा मीटर का कैथोड (C) जोड़ दीजिये। सैल के धनाग्र को वोल्टा मीटर के एनोड (A) से सम्बन्धित कर दीजिये। ताम्र वोल्टा मीटर के कैथोड के दोनों ओर एक साथ जुड़ी हुई एनोड की दो प्लेटें हैं। अतः ताँबा (Cu) कैथोड के दोनों ओर जमा होगा।

स्पर्शज्या धारा मापी को पूर्ववत् चुम्बकीय याम्योत्तर में समंजित (adjust) कर लीजिये। निर्देशक $0°$—$0°$ के समानान्तर हो और चुम्बकीय सुई कुंडल के तल में।

दिक्परिवर्तक में (1, 4) और (2, 3) के बीच वाले प्लग लगा कर धारा बहने दीजिये। परिवर्तनशील प्रतिरोध की सहायता से धारा मान ऐसा नियन्त्रित कीजिये

कि विक्षेप 45° के लगभग हो। अब धारा बन्द कर दीजिये और वोल्टा मीटर से कैथोड प्लेट निकाल कर सुखाने के बाद तोल लीजिये।

मान लीजिये, संहति $= m_1$ ग्राम

वोल्टा मीटर में कैथोड लगा कर धारा प्रवाहित कीजिये। साथ ही एक रोक घड़ी (Stopwatch) चला दीजिये। परिवर्तनशील प्रतिरोध से धारा मापी का विक्षेप स्थिर रखिये। लगभग 15 मिनट बाद धारा की दिशा धारा मापी में बदल दीजिये। ध्यान रहे कि दिक परिवर्तक में (1, 4) और (2, 3) की बजाय (1, 2) और (3, 4) के बीच वाले प्लग लगाने से धारा की दिशा केवल स्पर्शज्या धारा मापी के परिपथ में ही बदलती है, वोल्टा मीटर के परिपथ में नहीं। आगे लगभग 15 मिनट बाद धारा बन्द कर दीजिये। कैथोड को निकाल कर शुद्ध जल से धो कर फौरन् सोख्ते (Blotting Paper) की तहों में दबा कर सुखा दीजिये। यदि सुखाने में असावधानी हुई तो ताँबा आक्सीकृत (Oxidized) हो जायेगा जिससे उसका भार बढ़ जायेगा और फल अशुद्ध होगा। अब कैथोड को फिर तोल लीजिये।

मान लीजिये,

कैथोड की अन्तिम संहति $= m_2$ ग्राम

$\therefore$ एकत्रित ताँबे की संहति $= m_2 - m_1$ ग्राम

$= m$ ग्राम कहिये।

धारा प्रवाह का समय $= t$ से०

स्पर्शज्या धारा मापी का विक्षेप $= \theta$

ताम्र का वि० रा० तु० $Z = 0{\cdot}000329$ ग्राम/कूलम्ब

यदि विद्युत् धारा का मान C एम्पियर और स्पर्शज्या धारा मापी का परिवर्तन गुणक K *e.m.u.* हो, तो,

धारा मापी के लिये,

$$C = 10\ K \tan\ \theta \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(i)}$$

और वोल्टा मीटर के लिये,

$$m = ZCt \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(ii)}$$

$$K = \frac{1}{10} C \times \cot\ \theta \qquad \text{समीकरण (i) से}$$

$$= \frac{1}{10} \times \frac{m}{Zt} \times \cot\ \theta\ \ e.m.u. \quad \text{समीकरण (ii) से}$$

$$= \frac{m}{Zt} \cot\ \theta \ \text{एम्पियर।}$$

उदाहरण—स्पर्शज्या धारा मापी का परिवर्तन गुणक निकालने के एक प्रयोग में 50 मिनट तक धारा बहाने पर वोल्टा मीटर के कैथोड पर 3·29 ग्राम ताम्र एकत्रित

हुआ। यदि प्रयोग के समय धारा मापी का विक्षेप लगातार 45° रहा हो, तो धारा मापी का परिवर्तन गुणक बताइये।

मान लीजिये धारा मापी का परिवर्तन गुणक K वि० चु० इ० और धारा C एम्पियर है। तो,

स्पर्शज्या धारा मापी के लिये,

$$C = 10\ K \tan 45^\circ$$
$$= 10\ K$$

और वोल्टा मीटर में,

$$m = Z\,Ct$$

$$\therefore \quad C = \frac{m}{Zt}$$

$$\therefore \quad 10K = \frac{3{\cdot}29}{{\cdot}000329 \times 50 \times 60}$$

$$\therefore \quad K = \frac{100}{30 \times 10} = \frac{1}{3}$$

$= {\cdot}333$ वि० चु० इ०

$= 3{\cdot}33$ एम्पियर।

5.5 **विद्युद्विश्लेषण के उपयोग--**

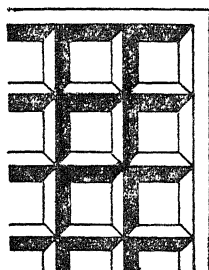
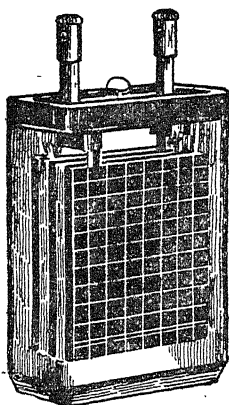
(i) **इलेक्ट्रोप्लेटिंग (Electroplating)**--विद्युद्विश्लेषण द्वारा भद्दे रंग की धातु की वस्तुओं पर चमकीली और सुन्दर धातुओं की पतली तह जमाने की क्रिया को विद्युत् से कलई चढ़ाना या इलेक्ट्रोप्लेटिंग कहते हैं। जिन वस्तुओं पर कलई चढ़ानी हो उनको अच्छी प्रकार साफ़ करने के बाद सुचालक तार से उपयुक्त विद्युद्विश्लेष्य में लटका कर उसे कैथोड बना देते हैं। एनोड प्रायः उसी धातु का बनाया जाता है जिसकी कलई चढ़ानी होती है। उपयुक्त विद्युद्विश्लेष्य के प्रयोग से फल सन्तोषजनक आता है। चाँदी की कलई के लिये पोटेशियम और सिल्वर का दुहरे साइनाइड का घोल जो $AgNO_3$ के घोल में KCN मिलाने से प्राप्त होता है प्रयुक्त होता है। सोने की कलई के लिये सोने और पोटेशियम का दुहरा साइनाइड तथा निकिल की कलई में निकिल अमोनियम सल्फेट और अमोनियम सल्फेट का घोल प्रयोग करते हैं।

कलई करते समय विद्युद्विश्लेषण के समय धारा का मान भी कैथोड के प्रति 50° वर्ग सें० मी० धरातल के लिये एक एम्पियर से अधिक नहीं होना चाहिये। निर्धारित मान की धारा बहाने से कुछ देर में वांछित मोटाई की कलई वस्तु पर चढ़ जायेगी।

(b) **विद्युत् टाइपिंग (Electro typing)**--पुस्तक के पूरे पृष्ठ की एक साथ अच्छी छपाई के लिये प्रयुक्त होती है। पहले तो साधारण रीति से अलग-अलग बने अक्षरों से पृष्ठ का पूरा विषय कम्पोज (Compose) किया जाता है। इसे मोम पर

दवा देते हैं जिससे अक्षरों के चिह्न मोम में बन जाते हैं। अब मोम पर ग्रेफाइट के चूण को छिड़क कर उसे विद्युत् चालक बनाने के बाद नीलेथोथे के घोल में लटका कर ऋणाग्र बना देते हैं। धनाग्र एक ताँबे की प्लेट बनाई जाती है। विद्युत् बहाने से कुछ समय में मोम पर काफी मोटी ताँबे की तह जम जाती है जिस पर पृष्ठ के अक्षर (उल्टे) उभरे हुए बन जाते हैं। मोम से हटा कर इसके पीछे और कोई आधार लगाने के बाद मशीन में लगा देते हैं जिससे पृष्ठ की छपाई होती है।

5.6. संचालक सेल (Accumulators)—

सिद्धान्त—वोल्टीय सेलों से देर तक धारा लेने से ध्रुवण (Polarization) की क्रिया बढ़ने से विपरीतात्मक वि० वा० बल बढ़ते-बढ़ते सेल के वास्तविक वि० वा० ब० के बराबर हो जाता है। परन्तु यह विपरीतात्मक वि० वा० बल स्थायी रूप धारण नहीं करता। विद्युत् विश्लेषण की क्रिया में भी कुछ वोल्टामीटरों में ध्रुवण की क्रिया होती है। अम्लीय (acid) जल के विद्युद्विश्लेषण से ऋणाग्र (Negative plate) पर हाइड्रोजन की एक तह जम जाती है जिससे विपरातात्मक वि० वा० ब० उत्पन्न होता है। विश्लेषक बाह्य धारा को बन्द करके एक धारा मापी में हो कर परिपथ जोड़ने से एक विक्षेप प्राप्त होगा।

चित्र 69

चित्र 70

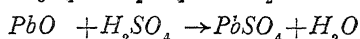
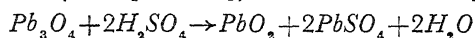
संचायक सेलों में विद्युद्विश्लेषण के इस विपरीतात्मक वि० वा० बल को विद्युद्वारों पर होने वाली रासायनिक क्रियाओं द्वारा स्थायी बना देते हैं। इस प्रकार बाहर से दी गई विद्युत् ऊर्जा सेल में रासायनिक स्थितिज ऊर्जा के रूप में संचित (Accumulate) हो जाती है। इसीलिये इनको संचालयक सेल (Accumulators) कहते हैं।

बाद में यही ऊर्जा विद्युत् ऊर्जा में पुनः परिवर्तित हो जाती है। वोल्टीय सेलों में प्रथम रासायनिक क्रिया में ही विद्युत् ऊर्जा का प्रजनन होता है, परंतु संचायक सेलों में द्वितीय (Secondary) रासायनिक क्रिया में विद्युत् ऊर्जा उत्पन्न होती है। अतः वोल्टीय सेलों को प्राथमिक (Primary) और संचायक सेलों को द्वैतीयक (Secondary) सैल कहते हैं।

सीसा संचालक सेल (Lead Accumulator)—सर्वप्रथम सन् 1860 ई० में प्लांटे (Plante) ने इनका आविष्कार किया, परन्तु बाद में फौरे (Faure) ने सन् 1881 ई० में सेल की प्लेटों की रचना में भारी सुधार किया। इस संशोधित रूप में इस सेल में सीसे की जाली (Gride) की दो प्लेट (चित्र 69) होती हैं जिनमें

प्रारम्भ में सीसे की लाल ग्राक्साइड (Pb_3O_4) अथवा लिथार्ज (Litharge) PbO और गन्धकाम्ल की गाढ़ी लेई भरी रहती है। ये प्लेटें एक काँच के आयताकार बर्तन में रखे गन्धकाम्ल में डूबी रहती हैं (चित्र 70)। रासायनिक क्रिया से दोनों प्लेटों पर (PbO_2+PbSO_4) अथवा अकेला $PbSO_4$ रहता है।

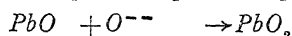
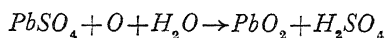
$$Pb_3O_4+2H_2SO_4 \rightarrow PbO_2+2PbSO_4+2H_2O$$

$$PbO \ +H_2SO_4 \rightarrow PbSO_4+H_2O$$

(a) अब सेल को आवेशित करने के लिये बाहर से धारा प्रवाहित की जाती है। विद्युद्विश्लेषण की क्रिया से धनाग्र (Anode) पर O और ऋणाग्र (Cathode) पर H_2 उत्पन्न होती है। ये गैसें संगत विद्युद्वारों से रासायनिक क्रिया करती हैं—

अत: आवेशन (Charging) के समय—

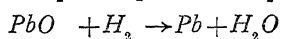
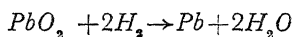
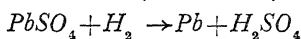
(i) धनाग्र पर आक्सीकरण (Oxidation) की क्रिया से PbO_2 (सीसा पर-आक्साइड) की मोटी तह जम जाती है।

$$PbSO_4+O+H_2O \rightarrow PbO_2+H_2SO_4$$

$$PbO \ +O^{--} \rightarrow PbO_2$$

(ii) ऋणाग्र पर अवकरण (Reduction) होने से स्पंजी सीसा उत्पन्न होता है।

$$PbSO_4+H_2 \rightarrow Pb+H_2SO_4$$

$$PbO_2 \ +2H_2 \rightarrow Pb+2H_2O$$

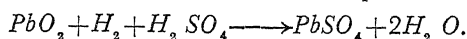
$$PbO \ +H_2 \rightarrow Pb+H_2O$$

इस प्रकार आवेशन के बाद धनाग्र पर काले बादामी रंग की PbO_2 की तह जम जाती है तथा ऋणाग्र पर हल्के भूरे रंग का स्पंजी सीसा रहता है। आवेशन की इस क्रिया में H_2SO_4 की उत्पत्ति होती है और लगभग 48 घंटे तक लगातार धारा बहाने के बाद पूर्ण आवेशन की अवस्था में गन्धकाम्ल का धनत्व 1·25 ग्राम/घन सें० मी० और सेल का वि० वा० बल 2·1 वोल्ट हो जाता है।

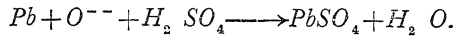
ऋणाग्र पर स्पंजी Pb और धनाग्र पर PbO_2 जमने की अवस्था प्लांटे (Plante) की प्लेटों में प्राप्त होने के लिये कई बार आवेशन की क्रिया दुहरानी पड़ती थी। उसमें समय और खर्च दोनों अधिक होते थे।

(b) अब इस सेल से बाह्य परिपथ जोड़ कर विद्युत् धारा ली जा सकती है। परन्तु इस धारा की दिशा पहली आवेशक (charging) धारा से विपरीत होगी। अत: विद्युद्विश्लेषण की क्रिया से इस बार धनाग्र पर H_2 और ऋणाग्र पर O मुक्त होगी—

निरावेशन (Discharging) की इस क्रिया में—

(i) धनाग्र पर अवकरण की क्रिया से $PbSO_4$ बनेगा।

$$PbO_2+H_2+H_2SO_4 \longrightarrow PbSO_4+2H_2O.$$

(ii) ऋणाग्र पर आक्सीकरण (oxidation) होगा, परन्तु अन्त में $PbSO_4$ ही बनेगा—

$$Pb+O^{--}+H_2\ SO_4 \longrightarrow PbSO_4+H_2\ O.$$

निरावेशन की क्रिया में दोनों प्लेटों पर $PbSO_4$ की उत्पत्ति होती है और $H_2\ SO_4$ खर्च होता है। अतः दोनों प्लेटों के विद्युतीय प्रकृति (electrical nature) का अन्तर कम होता जाता है। इससे सेल का वि० वा० बल कम होता जायेगा और गन्धकाम्ल का धनत्व घटता जायेगा। जिस समय वि० वा० बल 1·8 वोल्ट और घनत्व 1·18 ग्राम/घन सें० मी० हो जाय, तो सेल को निरावेशित समझना चाहिये और पुनः बाह्य धारा प्रवाहित करके आवेशन की क्रिया दुहरानी चाहिये।

इस अवस्था से आगे सेल से धारा लेने पर प्लेटों पर अघुलनशील $Pb\ SO_4$ की तह की मोटाई बढ़ सकती है और सेल की उपयोगिता घट जायेगी।

विशेष—

(i) पूर्ण आवेशन के बाद प्रयोग करते समय इसका वि० वा० बल 2·1 वोल्ट से गिर कर 2·0 वोल्ट पर पर्याप्त समय तक स्थिर रहता है। अतः संचायक सेल से एक स्थिर मान की धारा काफी देर तक ली जा सकती है।

(ii) प्लेटों का क्षेत्रफल तो अधिक होता है, परन्तु दूरी कम। इसलिये आन्तरिक प्रतिरोध बहुत ही नीचा (लगभग ·01 ओह्म) रहता है। अतः सेल को कभी भी ताँबे के तार से सीधे नहीं जोड़ना चाहिये। क्योंकि उस समय,

$$\text{धारा} = \frac{\text{वि० वा० बल}}{\text{प्रतिरोध}}$$

$$= \frac{2{\cdot}0}{{\cdot}01} = 200 \text{ एम्पियर।}$$

बहुत भारी धारा बहती है जिससे प्लेटों के रासायन (chemicals) नीचे गिर जायेंगे और प्लेटें टेढ़ी पड़ जायेंगी।

(iii) सेल को अधिक समय तक निरावेशित अवस्था में नहीं छोड़ना चाहिये, वरन्, $Pb\ SO_4$ की अघुलनशील मोटी तह जम जायेगी और सैल की उपयोगिता घट जायेगी।

क्षार संचायक सेल (Alkali Accumulator), **एडिसन** (Edison) या **नी-फे** (Ni-Fe) **सेल—**

रचना—(i) उत्तेजक द्रव—निकिल चढ़े इस्पात के बर्तन में कास्टिक पोटाश (KOH) का लगभग 21% घोल भरा रहता है, जिसमें लीथियम हाइड्राक्साइड ($Li\ OH$) की कुछ मात्रा मिली रहती है।

(ii) **धनाग्र—**इस्पात के जाली दार फ्रेम में निकिल हाइड्राक्साइड [$Ni\ (OH)_2$] और निकिल की छीलन की एकान्तर (alternate) तह भरी रहती है।

(iii) **ऋणाग्र**—छिद्रमय इस्पात की प्लेट में आइरन आक्साइड का बारीक चूर्ण भरा रहता है।

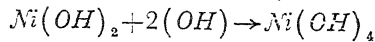
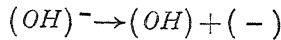
रासायनिक क्रिया—(i) आवेशन (Charging) के समय विद्युत् विश्लेषण से,

$$KOH \longrightarrow K^{+} + (OH)^{-}$$

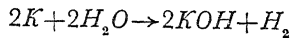
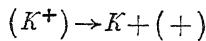
धनाग्र पर (OH) और ऋणाग्र पर (K^{+}) आयन जाते हैं।

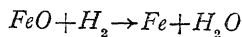
धनाग्र—(OH^{-}) आयन निरावेशित हो कर $Ni(OH)_2$ से रासायनिक क्रिया करता है और उसे $Ni(OH)_4$ में बदल देता है।

$$(OH)^{-} \rightarrow (OH) + (-)$$

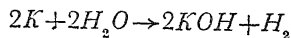
$$Ni(OH)_2 + 2(OH) \rightarrow Ni(OH)_4$$

ऋणाग्र—(K^{+}) आयन आवेश खोने के बाद समीपवर्ती जल से रासायनिक क्रिया करके KOH और H बनाता है।

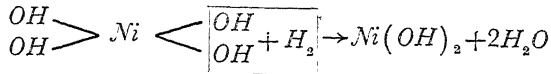
$$(K^{+}) \rightarrow K + (+)$$

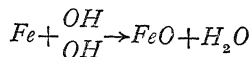
$$2K + 2H_2O \rightarrow 2KOH + H_2$$

यह H_2 ऋणाग्र के FeO को Fe में बदल देती है—

$$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$$

(ii) निरावेशन (discharging) की क्रिया में धारा की दिशा विपरीत होती है, अतः धनाग्र पर (K^{+}) और ऋणाग्र पर (OH^{-}) आयन मुक्त होता है।

धनाग्र—(K^{+}) निरावेशित हो कर H_2O की क्रिया से H_2 उत्पन्न करता है।

$$2K + 2H_2O \rightarrow 2KOH + H_2$$

अतः $Ni(OH)_4$ अवकरित (Reduced) हो कर $Ni(OH)_2$ में बदल जाता है।

$$\begin{matrix} OH \\ OH \end{matrix} > Ni < \boxed{\begin{matrix} OH \\ OH \end{matrix} + H_2} \rightarrow Ni(OH)_2 + 2H_2O$$

ऋणाग्र पर—Fe पुनः FeO में आक्सीकृत (oxidized) हो जाता है।

$$Fe + \begin{matrix} OH \\ OH \end{matrix} \rightarrow FeO + H_2O$$

यदि आप ध्यान से देखें तो आवेशन और निरावेशन दोनों क्रियाओं में KOH के दो अणु ही विद्युद्विश्लेषित होते हैं और दो ही अणु अन्य रासायनिक क्रियाओं से उत्पन्न होते हैं। अतः KOH का घनत्व सदैव एक ही (लगभग 1·22 ग्राम/घन सें० मी०) रहता है। अम्ल संचायक सेल (Acid accumulator) की भाँति क्षार संचायक सेल की आवेशन की दशा घनत्व द्वारा नहीं जानी जा सकती। पूर्ण आवेशित अवस्था में इसका वि० वा० बल 1·35 वोल्ट और निरावेशन के समय 0·9 वोल्ट तक आ जाता है।

क्षमता (Capacity)—संचायक सेल की क्षमता एम्पियर घंटा (Ampere Hour) में नापी जाती है। मान लीजिये, क्षमता 50 एम्पियर घंटा है। तो इस सेल से एक एम्पियर की धारा 50 घंटे तक लगातार ली जा सकती है।

अम्ल और क्षार संचायकों की तुलना

(i) क्षार संचायक म अम्ल संचायक के समान अधिक सावधानी की आवश्यकता नहीं है। काफी समय तक निरावेशित छोड़ने पर भी खराब नहीं होती।

(ii) क्षार संचायक का आन्तरिक प्रतिरोध अपेक्षाकृत अधिक होता है, अतः तार से सीधा जोड़ने पर भी अधिक क्षति नहीं होती।

(iii) अम्ल संचायक का लाभप्रद और सन्तोषजनक जीवन 2 से 3 वर्ष तक होता है। परन्तु क्षार संचायक सेल कई वर्ष तक ठीक काम देती है।

(iv) परन्तु अम्ल संचायक का वि० वा० बल और क्षमता दोनों ही अपेक्षाकृत अधिक है।

सारांश

फैरेडे का प्रथम नियम—मुक्त आयन की संहति उसे मुक्त करनेवाले विद्युत् आवेश की समानुपाती होती है।

द्वितीय नियम—विभिन्न आयनों की संहति उनके रासायनिक तुल्यांकों की समानुपाती होती है।

वि० रा० तु०—एक कूलम्ब आवेश द्वारा मुक्त हुई आयन की संहति उसके वि० र० तुल्यांक के बराबर होती है।

फैरेडे—प्रत्येक आयन के 1 ग्राम तुल्यांक मुक्त करने के लिये 96500 कूलम्ब की आवश्यकता होती है।

संचायक सेल दो होती है—
(i) अम्ल संचायक सेल
(ii) क्षार संचायक सेल

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. "विद्युद्विश्लेषण" से आप क्या समझते हैं?
   फैरेडे के विद्युद्विश्लेषण के नियमों की व्याख्या कीजिये।
2. (i) विद्युत् रासायनिक तुल्यांक, (ii) रासायनिक तुल्यांक, (iii) ग्राम तुल्यांक और (iv) फैरेडे पर टिप्पणी लिखिये।
3. ताम्र वोल्टा मीटर की सहायता से स्पर्शज्या धारामापी का परिवर्तन गुणक निकालने के प्रयोग का वर्णन कीजिये।
4. अम्ल संचायक सेल की रचना और कार्य विधि समझाइये। उपयुक्त रासायनिक समीकरण भी दीजिये। इसको द्वैतीयिक सेल क्यों कहते हैं?

5. तीन घंटे तक 1·5 एम्पियर की धारा बहाने से 300 वर्ग सें० मी० की प्लेट पर ताँबे की कितनी मोटी पर्त जमेगी यदि ताँबे का वि० रा० तु० 0·000329 ग्राम/कूलम्ब और घनत्व 8·8 ग्राम/घन सें० मी हो ।
6. एक ताम्र वोल्टा मीटर के श्रेणीक्रम में 2·8 ओह्म का तार है, जो 350 ग्राम पानी में डूबा है । 20 मिनट के स्थिर धारा प्रवाह से 0·66 ग्राम ताँबा कैथोड पर जमा होता है । यदि ताँबे का वि० रा० तु० 0·00033 ग्राम/कूलम्ब हो, तो बताइये कि इस समय में पानी का ताप कितना चढ़ जायेगा ? (उत्तर—लगभग 6·4°C)
7. एम्पियर के पाठों का परीक्षण करने के लिए एक चाँदी के वोल्टा मीटर से ऐमीटर श्रेणीक्रम में जोड़ देते हैं, और दोनों में से एक घंटे तक धारा प्रवाह किया जाता है । ऐमीटर ने 26 एम्पियर प्रकट किया और 1·0062 ग्राम चाँदी जमा हो गई । क्या ऐमीटर का पाठ शुद्ध था ? यदि नहीं, तो क्या त्रुटि थी ?
8. किसी वोल्टीय बैटरी के धन-ध्रुव अथवा ऋण-ध्रुव को कैसे पहचानोगे ? (क) चुम्बकीय प्रभावों द्वारा, (ख) धारा के विद्युत्-चुम्बकीय प्रभावों द्वारा ।
9. एक 2000 ग्राम के धातु के प्लेट पर अपने भार का $2\frac{1}{2}\%$ स्वर्ण रोपित करना है । यदि धारा 1 एम्पियर हो, और विद्युत् रासायनिक तुल्यांक ·0006808 ग्राम प्रति कूलम्ब हो, तो बताओ कि अभीष्ट मात्रा में सोना रोपित करने में कितना समय लगेगा ?

अध्याय 6

विद्युत्-चुम्बकीय प्रेरण

(Electro-Magnetic Induction)

6.1. औरस्टेड के आविष्कार के बाद फैरेडे ने सोचा कि विद्युत् धारा विद्युत् आवेश की गति से उत्पन्न होती है । अतः स्थिर और विराम स्थिति के आवेश की विद्युत् स्थितिज ऊर्जा गति उत्पन्न होने पर दो भागों में विभक्त हो जाती है ।

(i) **विद्युत् गतिज ऊर्जा**—जो स्वयं परिपथ में उष्मा, यांत्रिक आदि ऊर्जाओं में बदल जाती है ।

(ii) **चुम्बकीय ऊर्जा**—यह धारा से सम्बन्धित चुम्बकीय क्षेत्र की ऊर्जा है । इसी क्षत्र के कारण विद्युत् धारा अन्य चुम्बकीय क्षेत्रों से प्रतिक्रिया करती है ।

इन दोनों भागों का परस्पर अनुपात परिस्थितियों के अनुसार बदलता रहेगा ।

इस प्रकार विद्युत् ऊर्जा से गति का सम्बन्ध कर देने से चुम्बकीय ऊर्जा उत्पन्न होती है । तो इसका विलोम भी सम्भव होना चाहिये । चुम्बकीय क्षेत्र में भी गति अथवा समय के

साथ परिवर्तन (Variation with time) उत्पन्न करने से विद्युत् ऊर्जा की उत्पत्ति होनी चाहिये।

इस उद्देश्य से फैरेडे ने बहुत से प्रयोग किये। एक दिन अगस्त सन् 1831 ई० में एक धारामापी के परिपथ में लगे बंद कुंडल में चुम्बक का उत्तरी ध्रुव शीघ्रता से डालने से धारामापी में उत्पन्न हुए विक्षेप को देख कर उनकी प्रसन्नता का ठिकाना न रहा।

चुम्बक और धारा मापी के बन्द परिपथ के आपेक्षिक स्थानान्तरण से इस प्रकार उत्पन्न हुई धारा को **प्रेरित धारा** (Induced current) और इस घटना को **विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण** (Electro Magnetic Induction) कहा गया। "प्रेरित धारा" का मूल कारण "प्रेरित वि० वा० बल" (Induced *e.m.f.*) बताया।

6.2. **फैरेडे के विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण के नियम**—इसके बाद फैरेडे ने विभिन्न अवस्थाओं में विभिन्न प्रकृति के बहुत से प्रयोग किये। जिनके आधार पर उन्होंने दो नियम दिये—

(i) **प्रथम नियम :** जब कभी किसी परिपथ (Circuit) से सम्बन्धित (associated) चुम्बकीय बल रेखा प्रवाह (Magnetic flux) बदलती है, तो एक वि० वा० बल प्रेरित (induced) हो जाता है। परिपथ यदि बन्द है, तो एक विद्युत् धारा की उत्पत्ति हो जाती है।

फैरेडे के अनुसार किसी क्षेत्र की तीव्रता इकाई क्षेत्रफल से गुज़रनेवाली बल रेखाओं की संख्या के बराबर होती है। यदि चुम्बकीय क्षेत्र की तीव्रता H औरस्टेड है, तो उससे θ कोण पर झुके हुए A वर्ग सें० मी० के क्षेत्रफल वाले कुंडल से गुज़रनेवाली चुम्बकीय बल रेखाओं की कुल संख्या,

$$N = AH \sin\theta \text{ मैक्सवैल (Maxwell)}$$
$$= \text{चुम्बकीय बल रेखा प्रवाह (flux)}$$

(ii) **द्वितीय नियम**—प्रेरित वि० वा० बल सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह के परिवर्तन की दर का समानुपाती होता है।

इसी प्रसंग में प्रेरित वि० वा० बल की दिशा के लिये लैन्ज़ ने एक नियम दिया—

(iii) **लैन्ज (Lenz) का नियम**—प्रेरित वि० वा० बल की दिशा सदैव ऐसी होती है कि वह उस क्रिया और कारण का विरोध करता है जिससे उसकी उत्पत्ति होती है। अर्थात् प्रेरित वि० वा० बल सदैव परिपथ से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह का मान स्थिर रखने का प्रयत्न करता है।

प्रेरित विद्युत् वाहक बल फैरेडे के प्रथम नियम से यदि बल रेखा-प्रवाह के घटने से उत्पन्न हुआ है, तो लैन्ज़ के नियम से उसकी दिशा ऐसी होगी कि परिणामित विद्युत् धारा से सम्बन्धित बल रेखायें प्रथम क्षेत्र की दिशा में होंगी जिससे प्रभावित रेखा-प्रवाह बढ़े। और यदि वि० वा० बल की उत्पत्ति बल रेखा प्रवाह के बढ़ने के कारण हुई है,

तो प्रेरित बल रेखायें पूर्व क्षेत्र के विपरीत होंगी। गणित में यह बात इस प्रकार व्यक्त की जाती है कि प्रेरित वि० वा० बल, बल-रेखा-प्रवाह के परिवर्तन की दर से ऋणात्मक (–) चिह्न से सम्बन्धित होगा।

अब मान लीजिये, t सेकिंड में किसी परिपथ का बल-रेखा-प्रवाह (flux) N_1 से N_2 हो जाता है। तो

t से० में उत्पन्न हुआ फ्लक्स (flux) परिवर्तन $= (N_2 - N_1)$ मैक्सवेल

$\therefore$ रेखा प्रवाह परिवर्तन की दर $= \dfrac{N_2 - N_1}{t}$ मैक्स०/से०

फैरेडे के द्वितीय नियमानुसार प्रेरित वि० वा० बल,

$$e \propto \frac{N_2 - N_1}{t}$$

$$= K\frac{N_2 - N_1}{t}$$

परन्तु वि० चु० इ० (*e.m.u.*) प्रणाली में $K = 1$

$$\therefore \quad e = \frac{N_2 - N_1}{t}$$

परन्तु लैन्ज के नियम को भी शामिल करने के लिये इस व्यंजक से पहले (–1) से गुणा कीजिये

अर्थात्

$$e = -\frac{N_2 - N_1}{t} \; e.m.u. \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(i)}$$

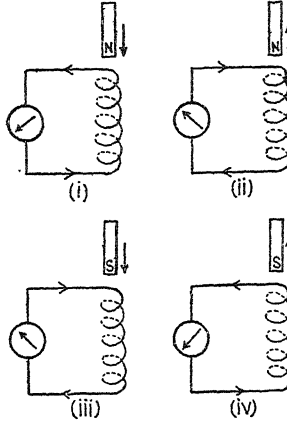
अथवा $$e = -\frac{N_2 - N_1}{t} \times 10^{-8} \text{ वोल्ट}$$

यह समीकरण फैरेडे के दोनों नियमों और साथ में लैन्ज के नियम का भी सम्मिलित गणितीय रूप है।

6.3. विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण के नियमों की प्रयोगात्मक व्याख्या—

(a) धारामापी के श्रेणीक्रम में लगे ताँबे के तार के एक सर्पिल कुंडल के अन्दर और बाहर, उत्तरी व दक्षिणी ध्रुव को बारी-बारी से चलाइये तो आप देखेंगे कि—

1. जब तक चुम्बक चलता रहता है, कुंडल से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह परिवर्तित होता रहता है और धारामापी में एक विक्षेप रहता है (फैरेडे का प्रथम नियम)। जैसे ही कुंडल और चुम्बक की आपेक्षिक गति शून्य होने से बल रेखा प्रवाह का बदलना रुकता है प्रेरित धारा भी रुक जाती है और धारामापी का विक्षेप समाप्त हो जाता है।

2. (i) चुम्बक के उत्तरी ध्रुव को अन्दर [चित्र 71 (i)] या दक्षिणी ध्रुव को बाहर [चित्र 71 (iv)] चलाने से धारा की दिशा समान रहती है। और विक्षेप एक ही दिशा में आता है। यदि सर्पिल कुंडल को सीधे हाथ में इस प्रकार पकड़ें कि उँगलियाँ धारा की दिशा में मुड़ें तो अँगूठा सर्पिल के N ध्रुव की ओर इशारा करता है। इस "अँगुष्ठ नियम" (Thumb Rule) की सहायता से पता चलता है कि इन दोनों दशाओं में धारा की दिशा ऐसी है कि चुम्बक के पास वाला सिरा N ध्रुव बनता है। इससे प्रेरित धारा प्रेरक चुम्बक के पास आनेवाले N ध्रुव का विकर्षण (repulsion) और दूर हटनेवाले S ध्रुव का आकर्षण (attraction) करके उस क्रिया का विरोध करती है जिसके कारण वह उत्पन्न हुई है। (लैन्ज़ का नियम)।

चित्र 71

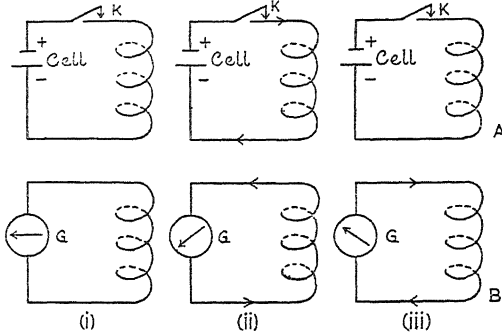
(ii) इसी प्रकार N ध्रुव को कुंडल से बाहर खींचने [चित्र 71 (iii)] या S ध्रुव को अन्दर चलाने [चित्र 71 (iii)] की क्रिया से चुम्बक की ओर वाले सिरे पर S ध्रुव उत्पन्न होता है। धारा की दिशा बदल जाती है और धारा मापी का विक्षेप दूसरी ओर हो जाता है। (लैन्ज़ का नियम)।

3. चुम्बक को अन्दर या बाहर ले जाने की गति जितनी अधिक होती है विक्षेप उतना ही अधिक आता है और प्रेरित धारा की प्रबलता उतना ही अधिक होती है। [फैरेडे का दूसरा नियम]।

(b) A और B ताँबे के तार के दो सर्पिल कुंडल हैं जो एक सीध में रखे हैं। A में एक सैल और कुंजी K लगी है तथा B में एक धारा मापी।

जब तक कुंजी K खुली है A और B दोनों में कोई धारा नहीं है। धारा मापी अविक्षेपित है [चित्र 72 (i)]. K को दबाने से A में धारा शून्य से अधिकतम मान की ओर बढ़ती है, अतः A की धारा से उत्पन्न हुआ किन्तु B से सम्बन्धित चुम्बकीय बल-रेखा प्रवाह भी शून्य से अधिकतम की ओर बढ़ता है। विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण से B में धारा प्रेरित होती है, G में क्षणिक विक्षेप आता है। परन्तु B में धारा की दिशा A की धारा के विपरीत है। B की धारा से उत्पन्न और B से सम्बन्धित बल रेखायें A की धारा से प्रेरित बल रेखाओं के विपरीत होंगी जिससे B से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह के बढ़ने का विरोध होगा (लैन्ज़ का नियम)। [चित्र 71 (ii)]

अब K को छोड़ दीजिये A की धारा अधिकतम से शून्य पर आजायेगी और उससे प्रेरित बल रेखा प्रवाह भी सिकुड़ कर शून्य पर आने का प्रयत्न करेगा। G में फिर

विक्षेप आता है, परन्तु विपरीत दिशा में। B में पुन: धारा प्रेरित होती है, परन्तु इसकी दिशा अब वही है, जो A की धारा की थी। इससे सम्बन्धित बल रेखायें पूर्व क्षेत्र के

चित्र 72

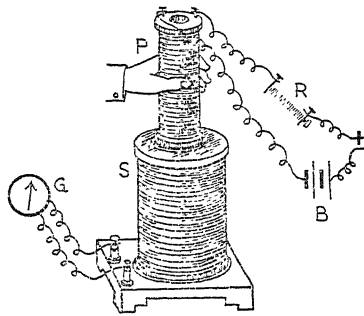
अनुकूल हैं और B से सम्बन्धित रेखा-प्रवाह के घटने का विरोध करती है (लैन्ज़ का नियम)। [चित्र 71 (iii)]

विद्युत्-चुम्बकीय प्रेरण की इस क्रिया को अन्योन्य प्रेरण (Mutual Induction) कहते हैं। 10 सैल वाले A कुंडल को प्राथमिक (Primary) और दूसरे B कुंडल को जिसमें प्रेरण होता है, द्वैतीयक (Secondary) कुंडल कहते हैं। प्राथमिक परिपथ के संयोजन (Make) के समय द्वैतीयक कुंडल में विपरीत दिशा की प्रेरित धारा को "विपरीत" (Inverse) धारा और परिपथ विमोचन (Break) के समय द्वैतीयक में समान दिशा में उत्पन्न हुई धारा को "अनुकूल" या "सीधी" (Direct) धारा कहते हैं।

(c) अब चित्र 73 की भाँति एक सर्पिल कुंडल के श्रेणी क्रम में एक सैल और प्रतिरोध जोड़ कर प्राथमिक कुंडल बनाइये। दूसरे चौड़े सर्पिल कुंडल में एक धारामापी जोड़िये। यह द्वैतीयक है। प्राथमिक कुंडल को द्वैतीयक के अन्दर और बाहर चला कर धारामापी का विक्षेप देखिये। आप देखेंगे कि–

चित्र 73

(i) जब द्वैतीयक से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह बढ़ता है, तो उसमें विपरीत (Inverse) धारा उत्पन्न होती है। और,

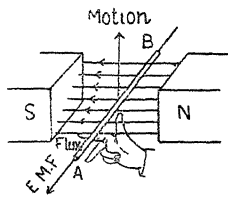
(ii) जब बल रेखा प्रवाह घटता है, तो अनुकूल (Direct) धारा उत्पन्न होती है।

6.4. **ऊर्जा के अविनाशिता सिद्धान्त पर लैन्ज़ के नियम का परीक्षण**—ऊर्जा के अविनाशिता सिद्धान्त के अनुसार ऊर्जा का केवल रूप बदला जा सकता है। उसका प्रजनन (creation) या विनाश (destruction) असम्भव है। विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण में यदि धारा के रूप में विद्युत् गतिजा ऊर्जा उत्पन्न होती है, तो अवश्य ही वह किसी अन्य परन्तु समतुल्य ऊर्जा का केवल रूपान्तर है।

जब चुम्बक का उत्तरी ध्रुव किसी बन्द कुंडल की ओर लाया जाता है, तो लैन्ज़ के नियमानुसार उसकी ओर वाला सिरा भी उत्तरी ध्रुव की भाँति कार्य करता है। दोनों में विकर्षण होता है और चुम्बक को आगे चलाने में इस विकर्षण बल के विरुद्ध कार्य करना पड़ता है। यही यांत्रिक ऊर्जा कुंडल में विद्युत् गतिज ऊर्जा (धारा) के रूप में प्रकट होती है।

इसके विपरीत यदि उत्तरी ध्रुव पास लाने से उसकी ओर दक्षिणी ध्रुव की उत्पत्ति हुई होती तो उनमें आकर्षण होता। और यह प्रेरण आनेवाले ध्रुव की गति का विरोध करने की वजाय उसकी सहायता करता। ध्रुव को जरा-सा धक्का देने से उसकी गति बढ़ती जाती और परिपथ में विद्युत् गतिजा ऊर्जा (धारा) बाहर से विना किसी प्रकार की समतुल्य ऊर्जा लिये बढ़ती जाती। यह ऊर्जा अविनाश नियम के विरुद्ध है।

किसी चालक से सम्बन्धित यदि चुम्वकीय क्षेत्र वदलता है, तो चालक की विद्युत् स्थितिज ऊर्जा बदलती है, जो विद्युत् गतिज ऊर्जा के रूप (धारा) में प्रकट होती है।

6.5. **फ्लैमिंग का सीधे हाथ का नियम (Flemings Right Hand Rule)**—जब कोई सुचालक (conductor) किसी चुम्बकीय क्षेत्र को पार करता है, तो वह चुम्बकीय वल रेखाओं को काटता है। इस क्रिया में चालक से सम्बन्धित चुम्बकीय बल रेखाओं में परिवर्तन होता है। अतः विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण से एक वि० वा० बल उत्पन्न होता है। इस वि० वा० बल की दिशा फ्लैमिंग के नियम से ज्ञात हो सकती है—

चित्र 74 की भाँति, "अपने दायें हाथ का अँगूठा, उसके पास की उँगली और बीच की उँगली तीनों को इस प्रकार फैलाइये कि वे परस्पर 90° का कोण बनावें। यदि तर्जनी (Fore finger) चुम्बकीय क्षेत्र (Field) और अँगूठा (Thumb) चालक की गति (Motion) की दिशा में इशारा करे तो मध्य (Central) उँगली चालक में प्रेरित धारा (Current) अथवा प्रेरित वि० वा० बल (Induced *e.m.f.*) की दिशा बतायेगी।"

चित्र 74

चित्र 74 में $A\ B$ चालक ऊपर गतिमान हो रहा है जब कि क्षेत्र की दिशा दायें से बायें है। स्पष्ट है कि प्रेरित वि० वा० बल B से A सिरे की ओर कार्य करेगा।

6·6. **अन्योन्य प्रेरण (Mutual Induction)**—किसी भी परिपथ में विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण से धारा उत्पन्न करनेवाला उसी परिपथ से सम्बन्धित चुम्बकीय क्षेत्र यदि किसी अन्य परिपथ या चुम्बक से उत्पन्न होता है, तो प्रेरण का कारण "अन्योन्य प्रेरण" ((Mutual Induction) कहलाता है। इसी प्रसंग में पीछे वर्णित प्रयोग अन्योन्य प्रेरण के ही उदाहरण हैं। इस क्रिया में दो कुंडल होते हैं : एक प्राथमिक (Primary) और दूसरा द्वैतीयक (Secondary)। प्राथमिक में सैल लगी होती है और द्वैतीयक में प्रेरण होता है जिसकी धारामापी से पहचान होती है।

अन्योन्य प्रेरण गुणक (Coefficient of Mutual Induction) या अन्योन्य प्रेरकत्व (Mutual Inductance)

परिभाषा—(i) दो कुंडलों का अन्योन्य प्रेरकत्व प्राथमिक (Primary) में इकाई विद्युत् धारा प्रवाह से द्वैतीयक (Secondary) कुंडल से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह (flux) के बराबर होता है।

(ii) प्राथमिक में इकाई धारा परिवर्तन की दर के कारण द्वैतीयक में प्रेरित वि० वा० बल दोनों कुंडलों के अन्योन्य प्रेरकत्व (Mutual Inductance) के बराबर होता है।

प्रेरकत्व की व्यवहारिक इकाई **हैनरी** (Henry) है।

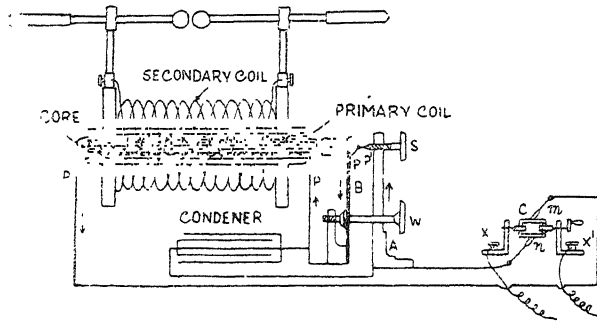
प्रथम परिभाषा के अनुसार दो कुंडलों का प्रेरकत्व एक "हैनरी" होगा यदि उनमें से प्राथमिक में 1 एम्पियर की धारा बहने से द्वैतीयक में 1 मैक्सवैल (Maxwell) बल रेखा प्रवाह (flux) सम्बन्धित हो जाय।

द्वितीय परिभाषा के अनुसार "हैनरी" प्रेरकत्व वाले कुंडलों के प्राथमिक में यदि धारा 1 एम्पियर/सेकिंड की दर से बदले तो द्वैतीयक में 1 वोल्ट वि० वा० बल प्रेरित होगा।

6·7. **आत्म प्रेरण (Self Induction)**—विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण का प्रभाव किसी परिपथ में बहनेवाली धारा के स्वकीय प्रभाव के कारण भी उत्पन्न होता है। परिपथ संयोजन और विमोचन के समय परिपथ की धारा का मान बदलता है। इसके फलस्वरूप धारा से उत्पन्न हुआ परिपथ से सम्बन्धित चुम्बकीय क्षेत्र भी परिवर्तित होता है। इससे जो धारा प्रेरित होती है उसकी दिशा ऐसी होती है कि वह धारा के मान को परिवर्तित होने से रोकती है। परिपथ संयोजन के समय जब कि मुख्य धारा शून्य से अधिकतम मान की ओर बढ़ती है प्रेरित धारा इसके **विपरीत** (Inverse) बहती है और विमोचन (Break) के समय **अनुकुल** (Direct) धारा उत्पन्न होती है। इस अनुकूल अतिरिक्त धारा के ही कारण विद्युत् पंखेवाले परिपथ को बन्द करते समय स्विच पर एक क्षणिक चिनगारी (spark) उत्पन्न हो जाती है।

कुंडल में चक्करों की संख्या बढ़ा देने से प्रेरकत्व (अन्योन्य अथवा आत्म) वढ़ जाता है। साथ ही कुंडल के बीच में कच्चे लोहे की "क्रोड़" (core) लगा देने से प्रेरकत्व और भी अधिक वढ़ जाता है।

6·8. **रुमकौर्फ का प्रेरण कुंडल (Ruhmkorff's Induction Coil)**—अन्योन्य प्रेरण के सिद्धान्त पर कार्य करके प्राथमिक परिपथ के बार-बार संयोजन (Make) और विमोचन (Break) की क्रिया से नीचे विभवान्तर की ऊँची धारा को बहुत ऊँचे विभवान्तर की नीची धारा में परिणत कर देनेवाला यंत्र है।

रचना—इसमें मुख्य भाग निम्न होते हैं—

चित्र 75

(i) **प्राथमिक** (Primary) (P)—पृथक्कृत मोटे ताँबे के तार के कई सौ चक्कर वल्कैनाइट की खोखली नली के ऊपर लिपटे रहते हैं जिसके अन्दर कच्चे लोहे के पतले तारों का क्रोड़ (core) रहता है।

(ii) **द्वैतीयक** (Secondary)—पृथक्कृत बारीक ताँबे के तार के कई हज़ार चक्कर प्राथमिक को घेरनेवाली समाक्षिक चौड़ी वल्कैनाइट की दूसरी नली पर लिपटे रहते हैं। इसके दोनों सिरों का सम्बन्ध ऊपर लगी "स्फुलिंग विसर्जन" (Spark discharge) करनेवाली दो धातु की छड़ों से रहता है। इन छड़ों में लगे अचालक हत्थों से पकड़ कर बीच की घुंड़ियों के बीच का "वायु अन्तर" (air gap) कम या अधिक किया जा सकता है।

(iii) **संयोजक-विमोचक-प्रबन्ध** (Make & Break arrangement)—

(a) लचीली स्प्रिंग पत्ती B के सिरे पर लगा कच्चे लोहे का हथोड़ा H कच्चे लोहे की क्रोड़ के सम्मुख रहता है।

(b) हथोड़े (H) की पीठ और पेंच S की नोक पर एक प्लैटीनम बिन्दु (p, p') है। स्तम्भ A में लगे पेंच W की सहायता से पत्ती B को आगे पीछे कर सकते हैं।

(c) C एक दिक्परिवर्तक (Commutator) है जिसके पेंच x, x' के बीच 6–12 वोल्ट की बैटरी जोड़ी जाती है। इसको घुमा कर प्राथमिक धारा की दिशा भी बदली जा सकती है और उसे बन्द भी किया जा सकता है।

(iv) **धारित्र** (Codenser)—ऊँची धारितावाला एक समान्तर प्लेट धारित्र प्लेटीनम बिन्दुओं (p, p') के समानान्तर में लगा दिया जाता है।

कार्य-विधि—(i) दिक्परिवर्तक (commutator) में 6–12 वोल्ट की एक बैटरी लगा कर प्राथमिक में धारा बहाइये। मान लीजिये धारा तीरों की दिशा में चलती है। धारा के चुम्बकीय प्रभाव से क्रोड़ (core) चुम्बकित हो जायेगा और H की ओर वाले सिरे पर N ध्रुव बनेगा (धारा की दिशा वामावृत्त है)। कच्चे लोहे का हथोड़ा H क्रोड़ की ओर खिचेगा और प्लेटीनम बिन्दुओं का संस्पर्श (contact) टूटने से प्राथमिक परिपथ टूट जायेगा। क्रोड़ अचुम्बकित हो जायेगी और लचीली पत्ती B हथोड़े H को पूर्व स्थिति में ला कर प्लेटीनम बिन्दुओं का संस्पर्श करा देगी। प्राथमिक परिपथ पुनः संयोजित (made) हो जायेगा। क्रोड़ फिर चुम्बकित हो कर H को खींचेगी।

इस प्रकार जब तक प्राथमिक कुंडल में बैटरी जुड़ी है प्लैटीनम बिन्दुओं का संस्पर्श बनता और टूटता रहेगा। इससे प्राथमिक परिपथ में उसी आवृत्ति से संयोजन (make) और विमोचन (Break) होता रहेगा। इसकी आवृत्ति (frequency) लचीली पत्ती B की लम्बाई और प्रत्यास्थता (elasticity) पर निर्भर करेगी।

(ii) संयोजन (Make) के समय आत्म प्रेरण (Self induction) के कारण प्राथमिक में एक विपरीत वि० वा० बल उत्पन्न होगा जो धारा का विरोध करेगा। अतः धारा शून्य से अधिकतम मान तक जाने में साधारण अवस्था की अपेक्षा अधिक समय लेगी जिससे उसके परिवर्तन की दर कम हो जायेगी। विमोचन (Break) के समय प्लेटीनम बिन्दुओं के बीच वायु अन्तर (air gap) आ जाने से अनन्त प्रतिरोध परिपथ में आ जाता है और धारा शीघ्रता से शून्य मान पर आ जाती है। आत्म प्रेरण इस समय भी धारा के एकदम घटने का विरोध करता है, परन्तु फिर भी संयोजन की अपेक्षा विमोचन के समय धारा परिवर्तन की दर काफी ऊँची रहती है।

(iii) प्राथमिक में बहनेवाली धारा से उत्पन्न हुआ चुम्बकीय बल रेखा प्रवाह (flux) द्वैतीयक से भी सम्बन्धित रहता है। अतः प्राथमिक धारा के बढ़ने या घटने पर द्वैतीयक से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह (flux) भी उसी दर से परिवर्तित होता है। इससे द्वैतीयक (Secondary) में एक वि० वा० बल प्रेरित होता है। परन्तु क्योंकि विमोचन के समय संयोजन (make) की अपेक्षा परिवर्तन की दर अधिक होती है, अतः विमोचन (Break) के समय प्रेरित वि० वा० बल अपेक्षाकृत अधिक ऊँचा होता है। "स्फुलिंग अन्तर" (discharge gap) को ऐसा नियंत्रित करते हैं

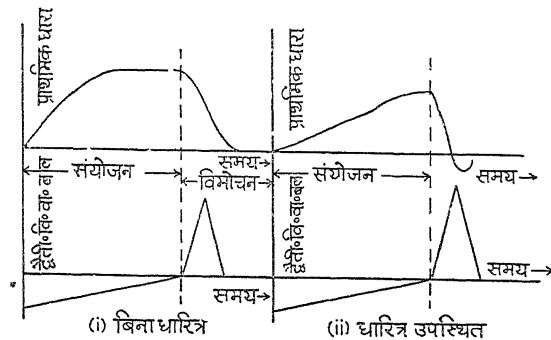
कि संयोजन पर उत्पन्न हुए द्वैतीयक में वि० वा० बल के कारण विसर्जन न हो सके। अतः केवल विमोचन के समय ही एक दैशिक (unidirectional) विच्छिन्न (intermittent) विसर्जन होता है।

(iv) **धारित्र (Condenser) की उपयोगिता**—विमोचन (Break) के समय आत्म प्रेरण से प्राथमिक में प्रेरित अनुकूल धारा (Induced direct current) इतनी अधिक प्रबल होती है कि धारित्र की अनुपस्थिति में इस अतिरिक्त (extra) धारा के कारण प्लैटीनम बिन्दुओं के बीच एक विद्युत् विसर्जन होने लगता है। इसके दो दुष्परिणाम होते हैं—

(1) प्लैटीनम बिन्दु जल्दी ही खराब हो जाते हैं।

(2) जितनी देर तक यह विसर्जन होता रहता है प्राथमिक परिपथ जुड़ा रहता है और इससे धारा परिवर्तन की दर घट जाती है। द्वैतीयक में प्रेरित वि० वा० बल इतना नहीं हो पाता जितना सम्भव है।

ऊँची धारिता का एक धारित्र प्लेटीनम बिन्दुओं के बीच लगा देने से यह अतिरिक्त धारा वायु अन्तर (air gap) में से जाने की बजाय धारित्र को आवेशित करती है। धारिता ऊँची होने के कारण उसकी प्लेटों के बीच विभवान्तर इतना नहीं हो पाता कि वायु अन्तर में विसर्जन हो सके।

विसर्जन रुक जाने के अतिरिक्त एक लाभ और होता है। आवेशित होने के फौरन बाद ही धारित्र अपने आप प्राथमिक परिपथ में हो कर विपरीत दिशा में धारा बहा कर निरावेशित हो जाता है। क्रोड़ अपना चुम्बकत्व खोने के साथ-साथ विपरीत दिशा में

चित्र 76

चुम्बकित हो जाती है। अतः द्वैतीयक से सम्बन्धित फ्लक्स "flux" अधिकतम से शून्य तक आने के बाद ऋणात्मक दिशा में भी चला जाता है।

इस प्रकार धारित्र जोड़ देने से बल रेखा प्रवाह (flux) में कुल परिवर्तन (Total change) तो अपेक्षाकृत बढ़ जाता है (क्रोड़ के विपरीत चुम्बकत्व से)

परन्तु उस परिवर्तन के होने में लगा कुल समय कम हो जाता है (विसर्जन बन्द होने से)। अतः दोनों कारणों से फ्लक्स परिवर्तन की दर और उसके साथ प्रेरित वि० वा० बल अत्यधिक बढ़ जाता है। धारित्र की उपस्थिति और अनुपस्थिति दोनों अवस्थाओं के लिये प्राथमिक में धारा द्वैतीयक में प्रेरित वि० वा० बल का समय के साथ परिवर्तन चित्र 76 (i) और 76 (ii) में दिखाया गया है।

विशेष—(i) प्राथमिक में धारा की प्रबलता निश्चित है, अतः उष्मीय प्रभाव को घटाने के लिये उसका प्रतिरोध कम रखा जाता है। यही कारण है उसमें चक्कर कम होते हैं और तार मोटा होता है।

$$\text{उष्मा } H \propto C^2Rt$$

$$\therefore \quad \text{उष्मा } H \propto R \text{ यदि धारा } C \text{ और } t \text{ स्थिर रहें।}$$

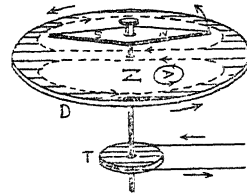
(ii) द्वैतीयक में प्रेरित वि० वा० बल का मान स्थिर है, अतः उसमें उष्मीय हानि (Heat loss) कम करने के लिये उसका प्रतिरोध ऊँचा रखना चाहिये।

$$H \propto \frac{E^2}{R} t$$

$$\therefore \quad H \propto \frac{1}{R} \text{ यदि वि० वा० ब०} E \text{ और समय } t \text{ स्थिर रहें।}$$

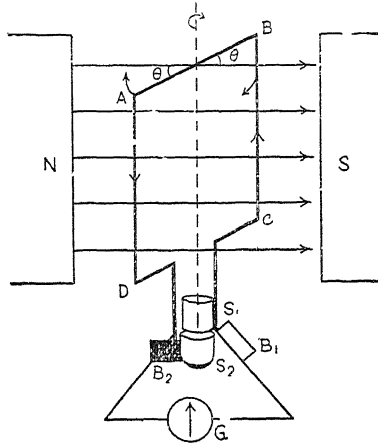
(iii) भँवर धाराओं (Eddy currents) की उष्मीय हानि को रोकने के लिये क्रोड़ बजाय कच्चे लोहे की एक छड़ लेने के पतले तारों से बनाई जाती है।

6.9. **भँवर (Eddy) या फोको (Foucault) धाराएँ**—पतले तार की बजाय यदि किसी सुचालक चकती को भी किसी चुम्बकीय क्षेत्र में घुमाया जाता है, तो उसको काटने वाली बल रेखाओं की संख्या घटने और बढ़ने लगती है। इससे चकती के धरातल पर स्थानीय धारायें प्रेरित हो जाती हैं। आकृति में यह भँवर जैसी होती हैं इसीलिये इनको भँवर धारा (Eddy Current) कहते हैं। इनके खोज करनेवाले वैज्ञानिक फोको (Foucault) के नाम पर इनको फोको धाराएँ भी कहते हैं।

एक क्षैतिज चकती D को ऊर्ध्व अक्ष पर घुमाने का प्रबन्ध T पहिये की सहायता से कीजिये। चकती के ऊपर परिभ्रमण अक्ष पर ही एक चुम्बकीय सुई चूल पर सन्तुलित कर दीजिये। चकती को घुमाने से सुई भी घूमने लगती है।

चित्र 77

लैन्ज़ के नियमानुसार जो भाग सुई के N ध्रुव की ओर आने ही वाला होता है उस पर धारायें वामावृत्त होती हैं। अतः वह भाग N ध्रुव का प्रभाव दिखाता है और सुई के N ध्रुव को विकर्षित करता है।

भँवर धाराओं को रोकने के लिये ही विद्युत् चुम्बक या प्रेरण कुंडल की कच्चे लोहे की क्रोड़ अलग-अलग पतले तारों की बनाई जाती है।

6.10. **सम (Uniform) क्षेत्र में कुंडल का घूमना**—मान लीजिये $ABCD$ एक कुंडल है जिसका क्षेत्रफल A वर्ग सें० मी० है। H औरस्टेड के सम

चित्र 78

क्षेत्र में कुंडल को वामावर्त दिशा में इस प्रकार घुमाया जा रहा है कि उसकी परिभ्रमण अक्ष क्षेत्र (H) के अभिलम्ब है। कुंडल के परिपथ में एक धारा मापी G भी लगा है। जिसके सिरे दो ब्रुश B_1 B_2 से जुड़े हैं। कुंडल के दोनों सिरों से जुड़े सुचालक बेलन S_1 S_2 पर क्रमश: B_1 B_2 रगड़ते हैं।

मान लीजिये गति प्रारम्भ करने के t_1 से० बाद उसका तल क्षेत्र से θ_1 और t_2 से० बाद θ_2 कोण बनाता है। अत: t_1, t_2 समय पर कुंडल से गुज़रनेवाली बल रेखाओं की संख्या क्रमश:,

$$N_1 = AH \operatorname{Sin} \theta_1, \quad N_2 = AH \operatorname{Sin} \theta_2$$

अत: यदि $(t_2 - t_1) = t$ हो, तो,

रेखा प्रवाह परिवर्तन की दर,

$$= \frac{N_2 - N_1}{t}$$

प्रेरित वि० वा० बल $E = \dfrac{AH \operatorname{Sin} \theta_2 - AH \operatorname{Sin} \theta_1}{t}$ *e.m.u.*

$$= -\frac{AH}{t} (\operatorname{Sin} \theta_2 - \operatorname{Sin} \theta_1) \ e.m.u.$$

$$= -\frac{2AH}{t} \text{ Sin } \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \text{ Cos } \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

यदि $\frac{\theta_2 + \theta_1}{2} = \theta$, और $\frac{\theta_2 - \theta_1}{t} = \omega$ कोणीय वेग हो, तो

$$E = -\frac{2AH}{t} \; \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \text{ Cos } \theta \; \left[\text{Sin} \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right]$$

$$E = -AH\omega \text{ Cos } \theta$$

जब $\theta = 0$, $\quad E = E_0$

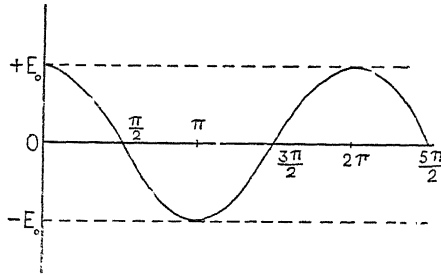
तो, $\quad E_0 = -AH\omega$.

$$\therefore \quad E = -E_0 \text{ Cos } \theta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \text{(i)}$$

परन्तु $\theta = \omega t$ होता है $\therefore$ $E = E_0$ Cos ωt भी होगा।

अब यदि $\theta = 0, \quad \pi/2, \quad \pi, 3\frac{\pi}{2}, \quad 2\pi$

तो $\quad E = E_0, \quad 0, \quad -E_0, \quad 0, \quad E_0$.

अतः यदि आप E, और θ में एक ग्राफ खींचें तो चित्र 79 की भाँति आयेगा।

चित्र 79

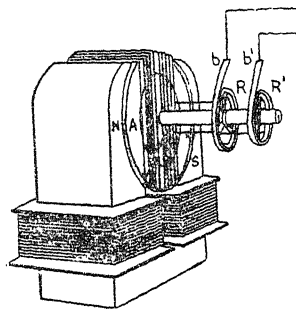
समीकरण (1) और उसका ग्राफ (चित्र 79) दोनों से स्पष्ट है कि प्रेरित वि० वा० बल का समय के साथ परिवर्तन भी एक सरल आवर्त्त गति (*S.H.M.*) के समान है। इसीलिये कभी-कभी इसको **"सरल आवर्त्त वि० वा० बल"** भी कह देते हैं।

चित्र 79 को देखिये तो ज्ञात होगा कि परिभ्रमण करते समय जब कुंडल क्षेत्र के समानान्तर है ($\theta = 0$) और उसको काटने वाला बल रेखा प्रवाह शून्य है, तो उस अवस्था पर प्रेरित वि० वा० बल अधिकतम E_0 है। इस अधिकतम मान E_0 को आयाम (Amplitude) कहते हैं। धीरे-धीरे वि० वा० बल घटता जाता है और जब कुंडल क्षेत्र के ठीक समकोणिक है, तो उससे गुज़रनेवाला प्रवाह (flux) अधिकतम है परन्तु वि० वा० बल शून्य है। क्योंकि इस समय परिवर्तन शून्य है। इसके बाद वि० वा० बल की दिशा बदल जाती है। धारा मापी में अब दूसरी ओर विक्षेप आने

लगेगा। जब कुंडल पुनः क्षेत्र के समान्तर हो जाता है ($\theta = \pi$) तो वि० वा० बल ऋणात्मक दिशा में अधिकतम मान प्राप्त करता है।

इस प्रकार कुंडल को क्षेत्र में लगातार घुमाते रहने से प्रेरित वि० वा० बल बार-बार दिशा बदलता रहता है। कुंडल के पूरे एक चक्कर में वि० वा० बल एक बार धनात्मक और एक बार ऋणात्मक दिशा में अधिकतम मान प्राप्त करता है। क्योंकि दिशा परिवर्तित होती रहती है इसीलिये इसको "प्रत्यावर्त्ती वि० वा० बल" (Alternating Electromotive Force) कहते हैं। परिणामित परिपथ की धारा को भी इसीलिये "प्रत्यावर्त्ती धारा" [Alternating Current (*A.C.*)] कहा जाता है। प्रत्यावर्त्ती वि० वा० बल और धारा दोनों की परिवर्तन की आवृत्ति (frequency) कुंडल की परिभ्रमण आवृत्ति (Frequency of Rotation) के बराबर होती है। 50 आवृत्ति की प्रत्यावर्त्ती धारा एक सेकिंड में 50 बार धनात्मक और 50 बार ऋणात्मक दिशा में अधिकतम मान प्राप्त करती है। अर्थात् 50 बार दिशा बदलती है। परिपथ में लगा धारा मापी भी उतनी ही बार विक्षेप की दिशा बदलेगा। यदि धारा मापी की धारा आवृत्ति से उसके साथ न घूम सके तो वह केवल शून्य पर ही खड़ी हो जायेगी।

6.11. प्रत्यावर्त्ती धारा और वि० वा० बल नापने के लिये उन यन्त्रों का प्रयोग होता है, जो धारा के वर्ग के समानुपाती प्रभावों पर आधारित होते हैं। अतः धारा C की दिशा चाहे (+) या (−) परन्तु $(+C)^2$ का मान एक ही (C^2) होगा। तप्त तार धारा मापी, तप्त तार एम्पियर मापी और तप्त तार वोल्ट मापी, धारा के उष्मीय प्रभाव पर कार्य करते हैं। जूल के नियमानुसार यह प्रभाव धारा के वर्ग (C^2) का समानुपाती होता है।

6.12. **प्रत्यावर्त्ती धारा डायनमो (A. C. Dynamo)**—

चित्र 80

सिद्धान्त—धारा 6.10 के अनुसार बहुत से चक्करों वाले कई कुंडलों को उपयुक्त चुम्बकीय क्षेत्र में घुमा कर एक प्रबल प्रत्यावर्त्ती धारा उत्पन्न करने वाला यन्त्र है।

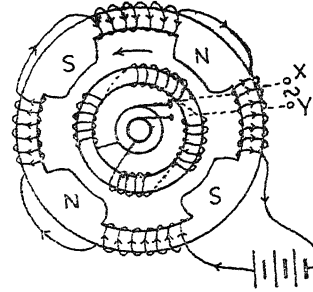
आवश्यक भाग—साधारणतया इसके तीन भाग होते हैं (चित्र 80)—

(i) **क्षेत्र चुम्बक** (Field magnets) (*NS.*) इनकी सहायता से चुम्बकीय क्षेत्र उत्पन्न किया जाता है जिसमें धात्र (armature) घूमता है। स्थायी चुम्बक या विद्युत् चुम्बक दोनों प्रयोग किये जा सकते हैं। परन्तु बड़े और भारी यन्त्रों में बाह्य, एक दैशीय (unidirectional)

धारा से उत्प्रेरित (excited) विद्युत् चुम्बक ही प्रयुक्त होते हैं। कभी-कभी एक से अधिक (*NS*) ध्रुवों के जोड़े वाला चुम्बक प्रयुक्त होता है।

(ii) **धात्र या आर्मेचर** (Armature) (*A*)—कच्चे लोहे के बेलन पर लिपटा हुआ पृथक्कृत ताँबे के तार के वहुत से चक्करों का कुंडल होता है, जो क्षेत्र चुम्बक के ध्रुवों के बीच परिभ्रमण करता है। कभी-कभी एक से अधिक कुंडल एक साथ घूमते हैं जो एक ही कच्चे लोहे के बेलन पर लिपटे रहते हैं। धात्र को घुमाने के लिये वह एक "शैफ्ट" (Shaft) पर लगी रहती है। इस शैफ्ट को वाह्य साधन (जल-शक्ति टर्बाइन, पैट्रोल इंजिन अथवा वाष्प इंजिन) से लगातार तेजी से घुमाया जाता है।

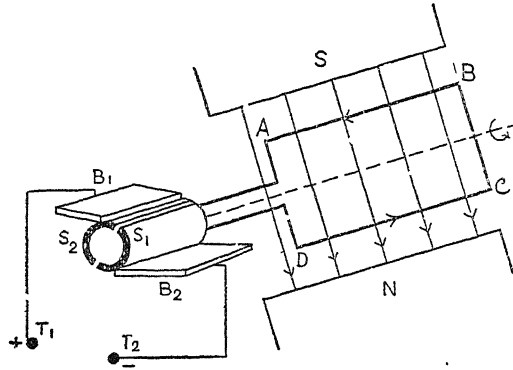
(iii) **स्लिप रिंग और ब्रुश** (Sliprings and Brushes)—धात्र को घुमानेवाले शैफ्ट पर ही दो धातु के बेलन या छल्ले (R, R^1) लगे रहते हैं जो परस्पर और शैफ्ट से पृथक्कृत होते हैं। इनसे धात्र कुंडल के दोनों सिरे अलग-अलग जुड़े रहते हैं। और दो ब्रुश (चित्र 80 में bb^1) बेलनों पर लगातार रगड़ते हैं। इन्हीं ब्रुशों से वाह्य परिपथ में प्रत्यावर्त्ती धारा (alternating current) जाती है।

आधुनिक प्रत्यावर्त्ती धारा डायनमो—ऊँचे विभवान्तर पर ऊँची धारा उत्पन्न करने के लिये घूमनेवाले कुंडलों और क्षेत्र उत्पन्न करनेवाले चुम्बकीय ध्रुवों (*NS*) के जोड़ों (pairs) की संख्या वढ़ानी पड़ती है। (चित्र 81 में ऐसा आधुनिक प्रत्यावर्त्ती डायनमो दिखाया गया है जिसके क्षेत्र चुम्बक में ($N-S$) ध्रुवों के दो जोड़े है और धात्र में चार कुंडल हैं। धात्र के चारों कुंडल कच्चे लोहे के एक ही बेलन की परिधि पर इस प्रकार लिपटे हैं कि यदि एक कुंडल वामावृत्त है तो उसके समीपवर्त्ती कुंडल दक्षिणावर्त दिशा में लिपटे होंगे। क्षेत्र चुम्बक बनाने के लिये कच्चे लोहे के बेलन में आमने-सामने

चित्र 81

कटे चार स्थानों में भी वामावर्त और दक्षिणावर्त क्षेत्र कुंडल एक के बाद एक लिपटे हैं। समस्त क्षेत्र कुंडल श्रेणीक्रम में जुड़े है और उनमें एक ही धारा बहती है। अतः *N* और *S* ध्रुव परिधि पर एक के बाद एक स्थित रहते हैं। धात्र को घुमाने से उसके समस्त कुंडलों में धारा की दिशा एक ही रहती है। अतः सब कुंडलों को श्रेणीक्रम में जोड़ कर कुंडल समुदाय के दोनों सिरों को केन्द्र पर दो धातु के अलग-अलग छल्लों (Slip rings) से जोड़ देते हैं। बाहरी परिपथ में धारा ले जाने के लिये इन छल्लों पर एक-एक ब्रुश लगातार रगड़ता रहता है। इन ब्रुशों का सम्बन्ध *X*, Y दो संयोजक पेंचों से होता है जहाँ से धारा बाह्य परिपथ में जाती है।

यहाँ पर क्षेत्र चुम्बक स्थिर रहता है, अतः इसे स्टेटर (Stator) कहते हैं और और घूमने वाली धात्र (armature) को रोटर (Rotor) कहते हैं।

यह आवश्यक नहीं है कि स्टेटर और रोटर का यही प्रबन्ध रहे। आजकल बनाये गये भारी प्रत्यावर्त्ती धारा उत्पादकों में धात्र को स्टेटर (Stator) और क्षेत्र चुम्बक को रोटर (Rotor) बनाया जाता है।

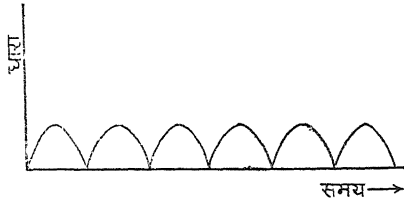
6.13. **दिष्ट धारा डायनमो (Direct Current Dynamo) का सिद्धान्त** (चित्र 82)—*NS* क्षेत्र में दक्षिणावृत्त घूमनेवाले कुंडल *ABCD* के सिरे धातु के एक ही बेलन के दो अर्द्ध भागों S_1, S_2 (Slip rings) से क्रमशः जुड़े हैं। S_1

चित्र 82

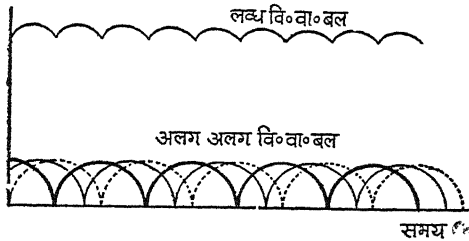
और S_2 दोनों भाग धात्र को घुमानेवाले शैफ्ट पर ही लगे हैं परन्तु उससे और परस्पर पृथक्कृत हैं। S_1, S_2 को रगड़नेवाले ब्रुश B_1 और B_2 से गुज़रनेवाली सरल रेखा क्षेत्र की दिशा के अभिलम्ब है तथा बेलन को दो भागों में बाँटनेवाला व्यास कुंडल के तल के समानान्तर है।

इस प्रबन्ध में कुंडल को दक्षिणावृत्त दिशा में घुमाइये। जब कुंडल क्षेत्र के अभिलम्ब अवस्था से आगे चलेगा तो उसमें बहनेवाली धारा की दिशा बदलेगी, परन्तु उसी ब्रुश B_1 और B_2 बेलन के एक अर्द्धभाग को छोड़ कर दूसरे से संस्पर्श करने लगेंगे। इसका फल यह होगा कि बाह्य परिपथ में सदैव धारा की दिशा ब्रुश B_1 से B_2 की ओर रहेगी।

इस प्रकार प्रत्यावर्त्ती धारा को दिष्ट धारा (Direct Current) में परिवर्तित करनेवाले फटे हुए छल्ले के प्रबन्ध को विभक्त छल्ला दिक्परिवर्तक (Split Ring Commutator) कहते हैं।

बाह्य परिपथ में चित्र 83 की भाँति एक ही दिशा में धारा बहेगी। परन्तु उसका मान लगातार बदलता रहेगा।

यदि धात्र में एक से अधिक कुंडल विभिन्न कोणों पर झुके हुए लें तो जब एक कुंडल से आनेवाली धारा का मान शून्य है, तो दूसरे से अधिकतम होगा। इस प्रकार कुंडलों

चित्र 83

की संख्या बढ़ाने से धारा का मान लगभग स्थिर रहता है यह बात चित्र 84 से स्पष्ट हो जायेगी। चित्र में नीचे तो अलग-अलग कुंडलों से आनेवाला वि०वा० बल है और ऊपर इन सब का संयुक्त लब्ध वि० वा० बल है।

चित्र 84

इसी सिद्धान्त पर दिष्ट धारा डायनमो (Direct Current Dynamo) की रचना की गई है।

6·14. **दिष्ट धारा डायनमो**—इसके भी तीन मुख्य भाग होते हैं—

(i) **धात्र** (armature)

(ii) **क्षेत्र चुम्बक** ((Field magnets)

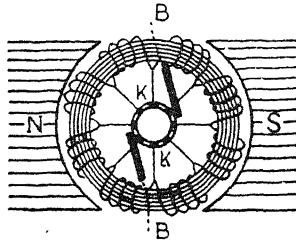
(iii) **विभाजित छल्ला दिक्परिवर्तक** (Split Ring Commutator)

(i) **धात्र** (Armature)—बाह्य परिपथ में धारा के मान में चढ़ाव उतार को कम करने और साथ ही उसका मान भी बढ़ाने के लिये कुंडलों की संख्या बढ़ा देते हैं। स्प्लिटरिंग को कुंडलों की संख्या से दूने भागों में बाँट देते हैं। प्रत्येक कुंडल के दोनों सिरे आमने-सामने के भागों से जोड़ देते हैं।

धात्र प्रायः दो प्रकार से बनाई जाती हैं—

(i) छल्लेनुमा धात्र (Ring Armature) (चित्र 85)

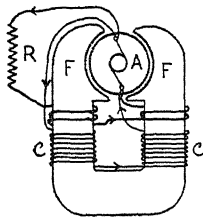
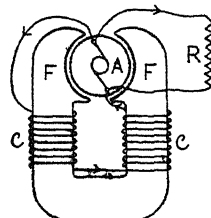
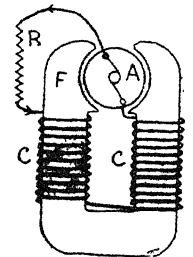
(ii) बेलनाकार धात्र (Cylindrical Armature)

छल्लेनुमा धात्र में कच्चे लोहे के एक छल्लानुमा क्रोड़ (core) पर चित्र 85 में कुंडल लिपटे हुए दिखाये हैं। प्रत्येक कुंडल एक ही दिशा में लिपटा है और समस्त कुंडल परस्पर श्रेणीक्रम में जुड़े हैं। पास-पास के दो कुंडलों के बीच का बिन्दु केन्द्र पर लगी स्प्लिटरिंग *KK* के 8 भागों में से एक एक भाग से जुड़ा है। *B*,*B*, स्प्लिटरिंग पर रगड़नेवाले दो ब्रुश बाह्य परिपथ में धारा भेजते हैं।

चित्र 85

क्रोड़ की परिधि पर व्यास के दो सिरों पर लगे हुए कुंडलों की धाराएँ विपरीत कला (Phase) में होंगी। बाह्य परिपथ में उत्पन्न हुई धारा का मान चित्र 84 की भाँति लगभग स्थिर ही रहेगा।

बड़े-बड़े डायनमो में बेलनाकार क्रोड़ पर कुंडल लपेटे जाते हैं। धात्र को घुमाने-वाले धुरे (Shaft) पर लगी स्प्लिट रिंग कुंडलों की संख्या से दूने भागों में विभक्त होती है और प्रत्येक कुंडल के दोनों सिरे आमने-सामने के दो भागों से जुड़े रहते हैं।

दिष्ट धारा डायनमो के क्षत्र चम्बक--दिष्ट धारा डायनमो में सदव क्षेत्र चुम्बक स्टेटर (Stator) और धात्र रोटर (Rotor) बनाया जाता है। क्षेत्र चुम्बकों को उत्प्रेरित (excite) करने के लिये डायनमो से उत्पन्न धारा ही क्षेत्र कुंडलों (Field Coils) में बहाई जाती है। इस दृष्टि कोण से तीन प्रकार के डायनमो कहे जा सकते हैं—

(i) **श्रेणीबद्ध दिष्ट धारा डायनमो** (Series Wound D. C. Dynamo)—बाह्य परिपथ में बहनेवाली पूर्ण धारा क्षेत्र कुंडलों में बहती है। बाह्य प्रतिरोध क्षेत्र चुम्बक पर लिपटे कुंडलों के श्रेणीक्रम में जुड़ा रहता है। (चित्र 86)

चित्र 86

चित्र 87

चित्र 88

इस प्रकार (Type) में एक दोष है कि यदि बाह्य प्रतिरोध बढ़ने लगे तो धारा निर्बल पड़ जाती है और चुम्बकीय क्षेत्र भी घट जाता है। परन्तु बाह्य परिपथ की धारा

अथवा लोड (Load) बढ़ने के साथ क्षेत्र भी बढ़ता है और एक सीमा पर स्थिर हो जाता है। इसका प्रयोग अन्त: घरों में प्रकाश करने के लिये ही होता है।

(ii) **पार्श्व** (Shunt) **बद्ध या सामान्तर बद्ध** (Parallex Wound)—क्षेत्र कुंडल और बाह्य परिपथ परस्पर समान्तर क्रम में होते हैं। क्षेत्र कुंडल के सिरे भी ब्रुशों से जुड़े रहते हैं (चित्र 87)। डायनमो से उत्पन्न हुई धारा का एक भाग बाह्य परिपथ में और शेष भाग क्षेत्र कुंडलों में बहता है।

इस प्रबन्ध का यह लाभ है कि बाह्य परिपथ खुला रहने पर भी क्षेत्र कुंडल में धारा बहती रहती है। परन्तु यह प्रबन्ध ऊँचे बाह्य लोड (High load) के लिये उपयुक्त नहीं है। जैसे-जैसे 'लोड' (load) या बाह्य परिपथ की धारा बढ़ती जाती है क्षेत्र कुंडल की धारा घटती जाती है और क्षेत्र निर्बल होता जाता है। परन्तु नीचे "लोड" पर इसका उल्टा होता है। इसका प्रयोग प्राय: सिनेमा यन्त्र चलाने या नगरों में प्रकाश करने में होता है।

(ii) **मिश्रित बद्ध** (Compound Wound)—इस प्रबन्ध में क्षेत्र चुम्वक पर दो कुंडल लिपटे रहते हैं। अधिक चक्करवाला कुंडल ब्रुशों से जोड़ देते हैं। जिससे वह बाह्य परिपथ के समान्तर क्रम में रहता है। थोड़े चक्करवाला कुंडल बाह्य परिपथ के श्रेणीक्रम में रहता है (चित्र 88)।

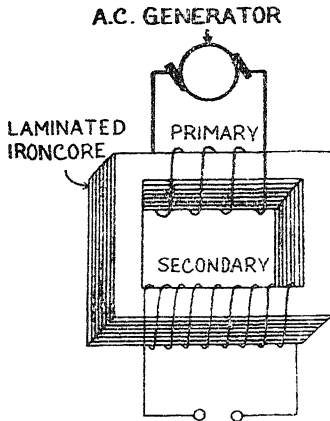
इस प्रबन्ध में श्रेणीबद्ध और पार्श्वबद्ध दोनों प्रकार के लाभ रहते हैं। अत: यह ऊँचे और नीचे सब प्रकार के लोड (load) के लिये उपयुक्त है। इसके ब्रुशों के बीच बाह्य परिपथ में कार्य करनेवाले वि० वा० बल का मान काफी स्थिर रहता है। साथ ही बाह्य परिपथ बन्द रहने पर भी क्षेत्र शून्य नहीं हो पाता। सभी बड़े-बड़े दिष्ट धारा डायनमो इसी प्रकार के होते हैं।

6.15. **विद्युत् मोटर (Electric Motor)**—विद्युत् डायनमो का उल्टा है। डायनमो परिभ्रमण यांत्रिक ऊर्जा (Mechanical Energy of Rotation) को विद्युत् ऊर्जा में परिणत करता है। परन्तु विद्युत् मोटर इसके विपरीत विद्युत् ऊर्जा से यांत्रिक ऊर्जा उत्पन्न करता है। सिद्धान्त में यह चल कुंडल धारा मापी (Moving Coil Galvanometer) के अनुरूप है। चुम्वकीय क्षेत्र में स्थित चालक में यदि धारा बहाई जायेगी तो चालक पर एक यांत्रिक बल (mechanical force) कार्य करेगा।

ए० सी० डायनमो की मशीन (यंत्र) के बाह्य ब्रुशों पर यदि एक बाह्य प्रत्यावर्त्ती वि० वा० बल आरोपित किया जाय, तो उसका धात्र (armature) घूमने लगेगा।

इसी प्रकार डी० सी० डायनमो में बाहर से दिष्ट धारा आरोपित करने से डी० सी० मोटर बन जायेगी।

परन्तु इस प्रसंग में एक बात ध्यान रखने की है। विद्युत् मोटर का धात्र (armature) जब चुम्बकीय क्षेत्र में परिभ्रमण करता है, तो "मोटर" के साथ-साथ "डायनमो" की क्रिया भी होती है। एक वि० वा० बल बाह्य धारा के विपरीत उत्पन्न हो जाता है। यह विपरीतात्मक (Back) वि० वा० बल धात्र की गति के साथ बढ़ता है। अतः यदि वाह्य आरोपित वि० वा० बल E और प्रेरित विपरीतात्मक वि० वा० बल e वोल्ट हो, तो परिपथ में प्रभावित वि० वा० बल $(E-e)$ वोल्ट होगा।

6.16. **विभव परिवर्तक या ट्रांसफार्मर (Transformer)**—दिष्ट धारा का विभवत्व (voltage) परिवर्तित करने के लिये प्रेरण कुंडल (Induction Coil) का वर्णन किया था। उसमें प्राथमिक परिपथ के संयोजन और विमोचन का प्रबन्ध रहता है जिससे परिणामित क्षेत्र बदलता है।

चित्र 89

प्रत्यावर्त्ती धारा के विभवत्व (Voltage) को बदलने के लिये ट्रांसफार्मर (Transformer) बनाये गये हैं।

रचना—नरम लोहे की चद्दरों को आयताकार या वृत्ताकार काट कर एक दूसरे के ऊपर परन्तु पृथक्कृत बहुत सी रख कर क्रोड (core) बनाई जाती है। इसी क्रोड़ पर प्राथमिक (Primary) और द्वैतीयक (Secondary) कुंडल लपेटे जाते हैं (चित्र 89)। प्राथमिक में प्रत्यावर्त्ती धारा बहने से क्रोड़ के अन्दर चुम्बकीय क्षेत्र भी उसी आवृत्ति से बदलता है। परन्तु क्रोड़ क्योंकि एक ही है, अतः प्राथमिक और द्वैतीयक में हो कर चुम्बकीय बल रेखायें एक बन्द चक्र (closed circuit) बनाती हैं।

मान लीजिये प्राथमिक और द्वैतीयक के प्रत्येक चक्कर का क्षेत्रफल A वर्ग सें० मी० है। प्राथमिक में n_P, और द्वैतीयक में n_S चक्कर हैं तथा किसी समय क्रोड़ में क्षेत्र की तीव्रता H औरस्टेड है। तो,

प्राथमिक से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह $N_P = n_P AH$ मैक्सवैल

द्वैतीयक से सम्बन्धित बल रेखा प्रवाह $N_S = n_S AH$ मैक्सवैल

$$\therefore \quad \frac{N_S}{N_P} = \frac{n_S AH}{n_P AH} = \frac{n_S}{n_P}$$

स्पष्ट है कि द्वैतीयक में फ्लक्स (flux) परिवर्तन की दर प्राथमिक से $\frac{n_S}{n_P}$ गुनी

है। अतः यदि प्राथमिक और द्वैतीयक में क्रमशः V_P और V_S विभवत्व हो, तो,

$$\frac{V_S}{V_P}=\frac{n_S}{n_P} \text{ होगा।}$$

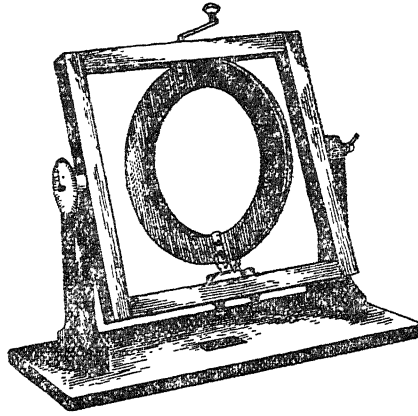
अतः ट्रांसफार्मर दो प्रकार के हो सकते हैं—

(i) जिसमें $n_S>n_P$ । उसमें द्वैतीयक के सिरों के बीच विभवत्व प्राथमिक विभवत्व से अधिक होगा। इसे उच्चायी (Step up) विभव परिवर्त्तक कहते हैं।

(ii) जिसमें $n_S<n_P$ । इससे द्वैतीयक में उत्पन्न हुआ विभवत्व प्राथमिक से नीचा होगा। इसे अपचायी (step down) ट्रांसफार्मर कहते हैं।

6.17. पृथ्वी प्रेरक (Earth Inductor)—

सिद्धान्त—पृथ्वी के चुम्बकीय क्षेत्र के विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण पर कार्य करती है। इससे किसी स्थान पर अवपात कोण (dip) निकाला जा सकता है।

रचना—एक लकड़ी के वृत्ताकार फ्रेम पर पृथक्कृत ताँबे के तार के बहुत से चक्कर लिपटे रहते हैं। तार के दोनों सिरों पर एक-एक संयोजक पेंच लगा रहता है। वृत्ताकार फ्रेम एक आयताकार चौकठे में एक व्यास के परितः (about) घूम सकती है। आयताकार चौकठा स्वयं भी घूम सकता है परन्तु उसकी परिभ्रमण अक्ष फ्रेम की अक्ष के अभिलम्ब होती है।

चित्र 90

क्रिया—संयोजक पेंचों को एक "बैलिस्टिक धारामापी" (Ballistic Galvanometer) से जोड़ दो। इस धारामापी का विक्षेप प्रवाह (flux) के परिवर्तन की दर पर निर्भर नहीं करता। बल्कि कुल फ्लक्स परिवर्तन (total change in flux) का समानुपाती होता है।

पृथ्वी प्रेरक को ऐसा घुमाइये कि केवल ऊर्ध्व तीव्रता की बल रेखायें ही कटें। परिभ्रमण की क्षैतिज अक्ष चुम्बकीय याम्योत्तर में होनी चाहिये। मान लीजिये धारा मापी का विक्षेप θ_1 है।

अब कुंडल को ऊर्ध्व अक्ष के गिर्द घुमाइये। इस बार का विक्षेप θ_2 क्षैतिज तीव्रता H के समानुपाती होगा। अतः,

$$\theta_1 \propto V, \quad \theta_2 \propto H$$

$$\therefore \quad \tan\ \theta = \frac{V}{H} = \frac{\theta_1}{\theta_2}$$

यहाँ θ अभीष्ट अवपात् कोण है।

सारांश

फैरेडे का नियम—

(i) किसी चालक से सम्बन्धित चुम्बकीय बल रेखा प्रवाह जब भी बदलता है चालक में एक वि० वा० बल प्रेरित हो जाता है।

(ii) प्रेरित वि० वा० बल रेखा प्रवाह परिवतन की दर का समानुपाती होता है।

(iii) **लैन्ज़ का नियम—**प्रेरित वि० वा० बल की दिशा ऐसी होती है कि वह उसी कारण या क्रिया का अवरोध करता है जिससे उसकी उत्पत्ति हुई है।

फ्लैमिंग का दायें हाथ का नियम—प्रेरित धारा की दिशा के लिये नियम—अपने दायें हाथ का अँगूठा, उसके पास की उँगली और मध्य उँगली परस्पर अभिलम्ब फैलाइये। यदि तर्जनी क्षेत्र की दिशा और अँगूठा चालक की गति की दिशा बताये तो मध्य उँगली प्रेरित धारा की दिशा बतायेगी।

रुमकौर्फ का प्रेरण कुंडल—नीचे विभवान्तर की भारी धारा को ऊँचे विभवान्तर की नीची धारा में वदल देता है।

A.C. Dynamo—बन्द कुंडल को चुम्बकीय क्षेत्र में लगातार घुमाने से *A.C.* उत्पन्न होती है।

D.C. Dynamo—स्प्लिट रिंग दिक्परिवर्तक की सहायता से *A.C.* (परिवर्त्ती धारा) को *D.C.* (दिष्ट धारा) में बदल देते हैं।

विद्युत् मोटर—चलकुंडल धारा मापी के सिद्धान्त पर ही कार्य करती है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. विद्युत् चुम्बकीय प्रेरण से आप क्या समझते हैं? फैरेडे और लैन्ज़ के तत्सम्बन्धी नियमों को समझाइये।
2. "लैन्ज़ का नियम ऊर्जा के अविनाशिता सिद्धान्त के अनुकूल है।" टिप्पणी लिखिये।
3. "आत्म प्रेरण" और "अन्योन्य प्रेरण" की व्याख्या कीजिये।
4. रुमकौर्फ के प्रेरण कुंडल की रचना और कार्य-विधि समझाइये। धारित्र की उपयोगिता पर विशेष प्रकाश डालिये।
5. परिवर्त्ती धारा (*A.C.*) डायनमो का सिद्धान्त समझाइये। चित्र भी दीजिये।
6. दिष्ट धारा उत्पादक की कार्य-विधि समझा कर लिखिये।
7. "विद्युत् मोटर" पर एक टिप्पणी दीजिये।
8. "ट्रांसफार्मर" और "पृथ्वी प्रेरक" की क्रिया समझाइये।
9. एक तार प्रेषण का तार पूर्व की ओर जा रहा है। जब यह टूट कर नीचे गिरेगा, तो प्रति मीटर कितना विभव उत्पन्न होगा यदि यह 5 मीटर की ऊँचाई से गिरे? किस दिशा में धारा बहेगी? ($g = 1000$ सें० मी०/सेंकड^2, $H = \cdot 18$ गाउस)

   (उत्तर, 9×10^{-5} वोल्ट पूर्व की ओर)

10. मान लो रेल की लाइन पृथग्न्यास पदार्थ पर बिछी है, और एक स्टेशन पर दोनों लाइन एक तार से जुड़ी हैं। सिद्ध करो कि जब रेल स्टेशन से चलेगी तब तार में धारा उत्पन्न होगी। चित्र द्वारा समझाइये कि जब रेल स्टेशन से चलेगी तो धारा किस दिशा में प्रवाहित होगी ?
11. एक मेज़ पर रखी हुई वेष्टन के अन्दर एक चुम्बक का उत्तरी ध्रुव शीघ्रता से प्रविष्ट कराया जाता है। प्रेरित धारा की दिशा क्या होगी ?
12. समझाइये कि लैन्ज़ के नियम का उपयोग गैल्वेनोमीटरों के विद्युत् चुम्बकीय अवमन्दन में क्या होता है ?

    रुमकौर्फ कुंडल और विद्युत् स्थैतिक यन्त्रों से उत्पन्न उच्च विभवों में क्या अन्तर है ?

अध्याय 7

टेलीग्राफ़ तथा टेलीफ़ोन

(Telegraph and Telephone)

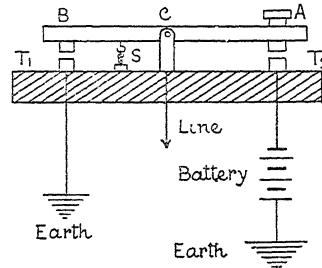
7.1. **टेलीग्राफ (Telegraph)**—विद्युत धारा के चुम्बकीय प्रभाव का लाभ उठाकर डैश (dash —) और डौट (dot) की भाषा में [मोर्स कोड (Morse code) के अनुसार] एक स्थान से दूसरे स्थान को समाचार भेजने के प्रबन्ध को टेलीग्राफ़ कहते हैं। इस प्रबन्ध में तीन मुख्य भाग होते हैं—

(i) प्रेषक (Transmitter)

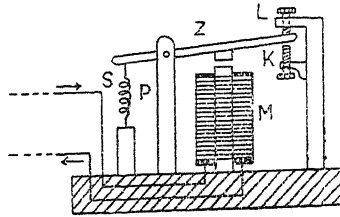
(ii) लाइन का तार (line wire)

(iii) ग्राहक (Receiver) या मोर्स ध्वानित्र (Morse Sounder) तथा योजित्र (Relay)

चित्र 91

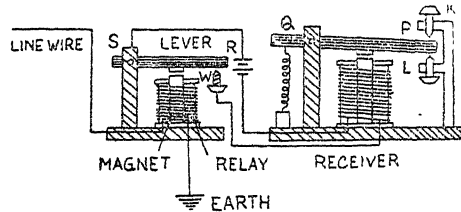
(i) **प्रेषक (Transmitter)**—पीतल की एक छड़ AB मध्य बिन्दु पर ऐबोनाइट के आधार में लगे छोटे से स्तम्भ C पर क्षैतिज अक्ष के परित: घूमने के लिये लगी है। छड़ के दोनों सिरों पर नीचे एक-एक पीतल का बटन लगा है। एक ओर स्प्रिंग S छड़ को नीचे दबाकर B बटन का सम्बन्ध आधार में लगे धातु के बटन T_1 से संस्पर्श कराता है। दूसरी ओर एबोनाइट का बटन ऊपर लगा है जिसे उंगली से दबाकर छड़ के नीचे के बटन को T_2 धातु बटन से संस्पर्श करा सकते हैं। परन्तु उस समय T_1 और B का सम्बन्ध टूट जाता है।

T_2 एक बैटरी के धनाग्र से जुड़ा है, और T_1 पृथ्वी से। बैंटरी का ऋणाग्र भी पृथ्वी से जुड़ा है और मध्य विन्दु C लाइन के तार में जुड़ा रहता है।

(ii) **लाइन का तार** (Line Wire)—परिपथ पूरा करने के लिये एक तार का काम तो पृथ्वी ही करती है। और दूसरा तार समाचार भेजने और प्राप्त करने वाले दोनों स्थानों के बीच ऊँचे ऊँचे खम्बों के द्वारा लगा रहता है। तांबे या लोहे का यह तार खम्भों से चीनी मिट्टी की गुट्टकों द्वारा पृथक्कृत (Insulated) रहता है।

(iii) **ग्राहक यंत्र** (Receiver)—यह एक मोर्स ध्वानित्र (Sounder) होता है (चित्र 92)। इसमें M एक विद्युत चुम्बक है जिसके बीच में नरम लोहे की क्रोड़ लगी है। चुम्बक के ठीक सामने एक लोहे का टुकड़ा Z है जो धातु की छड़ में लगा है। स्तम्भ P में लगी इस छड़ का एक सिरा स्प्रिंग S नीचे खींचती है और दूसरा सिरा धातु की टेक K, L के बीच लगा है जिनसे टकरा कर यह "कट-कट" की ध्वनि करता है।

चित्र 92

चुम्बक कुंडल का एक सिरा पृथ्वी से और दूसरा लाइन से लगा रहता है।

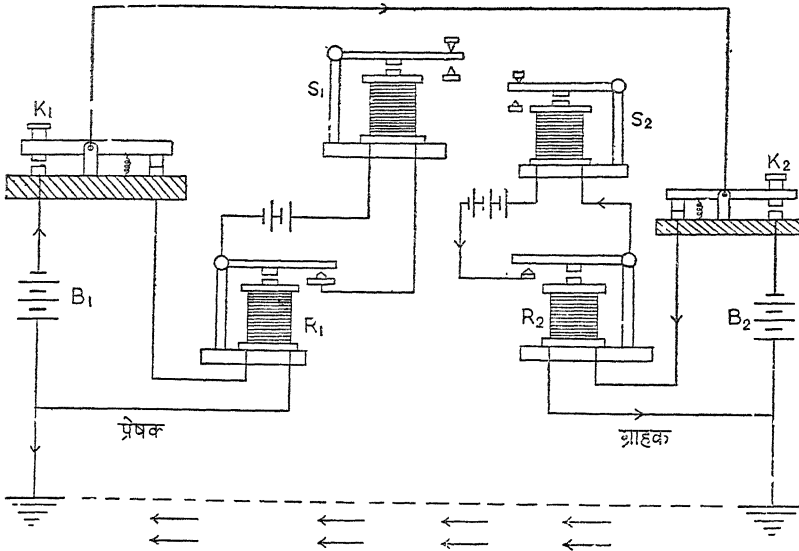
(iv) **योजित्र या रिले** (Relay)—जब बहुत दूरस्थ स्थानों पर समाचार भेजना होता है तो लाइन की धारा निर्बल पड़ जाती है और ध्वानित्र में संतोषजनक ध्वनि उत्पन्न नहीं होती। अतः प्रत्येक स्थान पर दूरस्थ स्थानों के परिपथ में एक अतिरिक्त विद्युत प्रबन्ध लगाते हैं जिसे योजित्र (Relay) कहते हैं (चित्र 93)।

इसमें एक विद्युत चुम्बक R होता है जिसकी क्रोड़ से बहुत थोड़ा ऊपर नरम लोहे

चित्र 93

की पत्ती होती है जो एक धातु की छड़ में लगी रहती है। चुम्बक कुंडल का एक सिरा लाइन से और एक सिरा पृथ्वी से रहता है।

इस प्रकार पहले ध्वानित्र के स्थान पर योजित्र ही मुख्य परिपथ में रहता है। ध्वानित्र के परिपथ का एक सिरा धातु के स्तम्भ से और दूसरा योजित्र की धातु छड़ के ठीक नीचे एक धातु के पेंच से जुड़ा रहता है। ध्वानित्र के परिपथ में एक स्थानीय

बैटरी रहती है। जब लाइन में कोई धारा बहती है तो चुम्बक छड़ को नरम लोहे की पत्ती के साथ नीचे खींच कर ध्वानित्र का परिपथ पूरा कर देता है। इस प्रकार ध्वानित्र में अपने ही परिपथ की बैटरी से प्रबल धारा बहती है और ध्वनि तेज आती है।

(v) **क्रिया प्रणाली**—समाचार प्रेषक और ग्राहक स्थानों पर मोर्स कुजी (K_1, K_2), योजित्र (R_1, R_2) और ध्वानित्र (S_1, S_2) का विद्युत् परिपथ चित्र 94 में प्रदर्शित है।

चित्र 94

प्रेषक स्थान पर K_1 दबाने से धारा लाइन में होकर, ग्राहक स्थान की कुंजी K_2 और योजित्र (R_2) में से गुजरने के बाद पृथ्वी के द्वारा प्रेषक स्थान की बैटरी के B_1 ऋणाग्र पर लौट आती है। योजित्र R_2 उत्प्रेरित (Excited) होकर ग्राहक स्थान के ध्वानित्र S_2 का परिपथ पूर्ण करके उसमें ध्वनि उत्पन्न करती है। समाचार भेजते समय प्रेषक स्थान के ध्वानित्र में ध्वनि नहीं होती।

इसी प्रकार दूसरे स्थान की कुंजी K_2 दबाने से पहले स्थान के ध्वानित्र से ध्वनि होगी।

डॉट (dot) की ध्वनि व्यक्त करने के लिये दो 'कट' की ध्वनियों में 1/9 से० का अन्तर करते हैं और डैश (dash) व्यक्त करने के लिये दो कट की ध्वनियों में 3/5 से० का समयान्तर रखते हैं। इन्हीं डौट और डैश की सहायता से **मौर्स कोड** के अनुसार समाचार भेजे जाते हैं। इन डौट और डैश को अभिलेखित करने का भी प्रबन्ध रहता

है। योजित्र के चलने के साथ ही एक स्याही वाला पैन एक घूमते हुये वेलन पर लगे कागज पर छूने लगता है। डौट के लिये छोटी और डैश के लिये लम्बी रेखा कागज पर अंकित हो जाती है।

इस रीति से केवल एक ही दिशा में लाइन पर समाचार भेजे जा सकते हैं। परन्तु **डूपले रीति** (Dupleix System) से एक साथ दोनों दिशा में समाचार भेजना और प्राप्त करना सम्भव है।

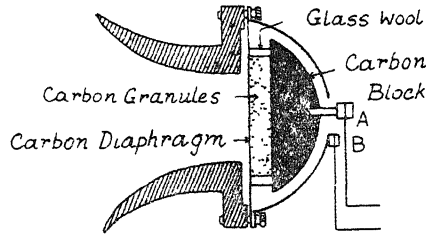
7.2. **टेलीफोन (Telephone)**—इस प्रबन्ध की सहायता से दो दूरस्थ स्थानों पर बैठे व्यक्तियों में परस्पर बातचीत हो सकती है। इसके भी तीन भाग होते हैं—

(i) कार्बन माइक्रोफोन प्रेषक (Carbon Microphone Transmitter)

(ii) लाइन का तार तथा बैटरी

(iii) ग्राहक (Telephone receiver)

(i) **कार्बन माइक्रोफोन**—जैसा कि चित्र 95 में दिखाया गया है, इसमें मुख्य भाग निम्नलिखित होते हैं—

(a) आबनूस का गोल घर जिसका एक ओर से मुंह शक्वाकार होता है।

चित्र 95

(b) शक्वाकार मुँह के पीछे कार्बन की कसी हुई पट्टी (Diaphragm)

(c) ठोस कार्बन का गोल टुकड़ा (चित्र में काला) जिसमें पीछे एक पीतल का संयोजक पेच *A* लगा है।

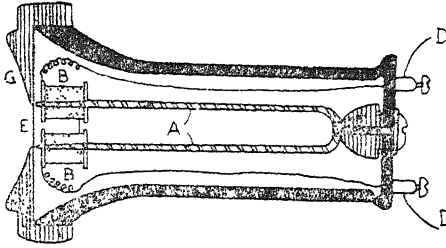
(d) कार्बन पर्दा (diaphragm) और कार्बन के कण टुकड़े के बीच कार्बन कण (granules) कुछ दबाव पर भरे रहते हैं, बाहर परिधि की ओर अचालक कांच की रुई (glass wood) भरी रहती है।

(e) कार्बन पर्दे का सम्बन्ध बाहर संयोजक पेंच *B* से होता है। *A* और *B* को परिपथ में जोड़ दीजिये।

क्रिया—शक्वाकार मुंह की ओर से कार्बन पर्दे के सामने बोलने से ध्वनि तरंगों के कारण पर्दा कम्पन करने लगता है। इससे पर्दे के पीछे भरे हुये कार्बन कणों का दबाव घटता बढ़ता जाता है। जब दबाब बढ़ता है तो कार्बन कण पास आ जाते हैं और परिपथ

का प्रतिरोध घट जाता है जिससे धारा बढ़ जाती है। दबाव घटने से प्रतिरोध बढ़ता है और धारा कम हो जाती है। धारा के इस उतार चढ़ाव से परिपथ में लगे ग्राहक (Receiver) में भी कम्पन होने लगते हैं जिससे बोली हुई ध्वनि पुनः उत्पन्न होती है।

(ii) **ग्राहक यन्त्र** (Telephone Receiver) (चित्र 96)—इसके मुख्य भाग ये हैं—

(a) U की आकृति का एक स्थायी चुम्बक A

चित्र 96

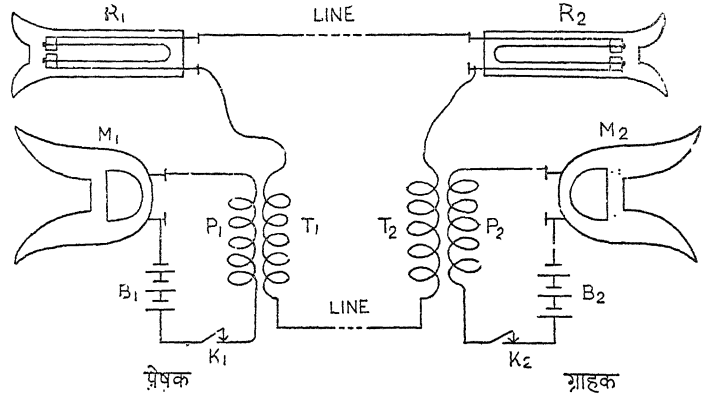
(b) चुम्बक के दोनों ध्रुवों के गिर्द पृथक्कृत तांबे के तार के बहुत से चक्करों वाले दो कुंडल B B। दोनों कुंडल श्रेणी क्रम में जुड़े हैं परन्तु परस्पर विपरीत दिशा में लिपटे हैं। एक यदि दक्षिणावृत्त है तो दूसरा बामावृत्त। दोनों कुंडल एक ही तार से बने हैं जिसके दोनों सिरे बाहर संयोजक पेचों से जुड़े हैं।

(c) चुम्बक से बहुत थोड़ी दूर फ्रेम के शक्वाकार मुंह G की ओर एक नरम लोहे का पर्दा (diaphragm) E है।

क्रिया—प्रेषक और ग्राहक एक ही परिपथ में जुड़े है जिसमें स्थिर धारा बहर ही है। इसमें नरम लोहे का पर्दा एक स्थिति में तना है। प्रेषक के पर्दे के सामने बोलने से परिपथ की धारा में उतार चढ़ाव उत्पन्न होता है। इससे चुम्बक के ध्रुवों के पास पर्दे को काटने वाली बल रेखाओं में परिवर्तन होता है। क्षेत्र के बदलने से पर्दे पर चुम्बकीय आकर्षण बल भी संगत रीति में बदलता है अतः पर्दा भी कम्पन करने लगता है। जब धारा बढ़ती है तो पर्दा अधिक अन्दर खिच आता है और जब घटती है तो अपने तनाव बल और प्रत्यास्थता से पीछे हट जाता है। पर्दे की गति से पास की वायु में कम्पन होते हैं जिससे ध्वनि का पुनरोत्पादन (Reproduction) होता है।

टेलीफोन का पूरा परिपथ—प्रेषक और ग्राहक स्थानों पर माइक्रोफोन M_1 M_2; ग्राहक R_1, R_2, बैटरी B_1, B_2 और उच्चायी विभव परिवर्तक (Step Up Transformer) T_1, T_2 आदि का संयुक्त परिपथ चित्र 97 में दिखाया गया है।

प्रेषक स्थान का माइक्रोफोन M को कुंजी K_1 और बैटरी B_1 में होकर T_1 ट्रांसफौमर के प्राथमिक P, के श्रेणीक्रम में जोड़ दिया जाता है। इसी प्रकार दूसरे स्थान पर

भी करते हैं। प्रेषक स्थान के ट्रांसफौर्मर में प्रेरित धारा ऊँचे विभवत्व (Voltage)

चित्र 97

और निम्न प्रबलता के साथ ग्राहक स्थान तक जाती है। इससे लाइन में जाते समय विद्युत ऊर्जा का खर्च कम होता है। उष्मीय हानि कम हो जाती हैं।

प्रेषक स्थान के माइक्रोफोन के सामने बोलने से परिपथ की धारा का मान बदलता है। जिससे ट्रांसफौर्मर के द्वैतीयक में धारा प्रेरित होती है। यह धारा दोनों स्थानों के ग्राहकों (Receivers) R_1 R_2 में बहकर ध्वनि उत्पन्न करती है। प्रेषक स्थान के संग्राही यंत्र R_1 में उत्पन्न हुई ध्वनि का बोलने वाले व्यक्ति पर कोई प्रभाव नहीं होता। क्योंकि हम सदैव बात करते समय अपनी बोली हुई ध्वनि को सुनते भी हैं।

सारांश

टेलीग्राफ़—इस उपक्रम से संवाद, एक संकेत-प्रणाली (मोर्स प्रणाली) द्वारा भेजे जाते हैं। ग्राहक के स्थान पर एक विद्युत् चुम्बक का आयोजन रहता है, जिसके कुंडल के तार के सिरे क्रमशः पृथ्वी और लाइन तार से जुड़े रहते हैं, जिनका सम्बन्ध प्रेषण-स्थल पर एक मोर्स कुंजी से रहता है। इस कुंजी को दबाने से विद्युत्-चुम्बक में धारा प्रवाह स्थापित हो जाता है, और वह एक नर्म लोहे के टुकड़े को आकृष्ट करता है। सामान्य स्थिति में इस टुकड़े का एक सिरा एक पेंच से सधा रहता है। धारा प्रवाह होने पर यह सिरा एक ऊपरी पेंच से टकरा कर ध्वनि उत्पन्न करता है। ध्वनियों के बीच अल्प और दीर्घ विरामों (Dots and dashes) के संयोजन से मोर्स प्रणाली की रचना की गई है। दूर के स्थानों पर संकेत भेजने के लिए योजित्र व्यवस्था का उपयोग किया जाता है। प्रेषण-स्थल पर मोर्स-कुंजी दबाने से एक विद्युत्-चुम्बक की ओर एक लोहे का टुकड़ा खिच आता है, जिससे एक ध्वनित्र में धारा-प्रवेश हो जाता है और निर्दिष्ट कारण से ध्वनि उत्पन्न होती है।

टेलीफोन—इसका प्रयोग भाषण, संगीत आदि के पुनरोत्पादन (reproduction) में होता है। कार्बन माइक्रोफ़ोन में एक कोष्ठ रहता है, जिसकी पीछे की दीवाल स्थिर

होती है, और सामने की ओर एक झिल्ली रहती है। कोष्ठ में कार्बन के कण भरे रहते हैं। ये कण एक विद्युत् परिपथ में व्यवस्थित रहते हैं। ध्वनि की तरंगों के टकराने से झिल्ली में कंपन उत्पन्न हो जाते हैं, और कार्बन के कणों का पार्थक्य बदलने से एक तदनुरूपी स्पंदनशील (fluctuating) धारा प्रवाहित होती है। ग्राहक-स्थल पर इस स्पंदनशील धारा को एक विद्युत्-चुम्बक में प्रवाहित किया जाता है। यह चुम्बक अपनी ओर एक लोहे के पर्दे को खींचता है। स्पंदनशील धारा के संगत पर्दे के कंपनों से ध्वनि का पुनरुत्पादन होता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. टेलीग्राफ की कार्य प्रणाली समझाइये।
2. "टेलीफोन" से आप क्या समझते हैं? चित्र खींचकर इसकी कार्य प्रणाली समझाइये।
3. स्वच्छ चित्रों की सहायता से समझाइये कि किस प्रकार किसी धातु के तार द्वारा विद्युतीय रूप से ध्वनि, एक स्थान से दूसरे तक प्रेषित की जा सकती है।
4. मनुष्य की सेवा में विद्युत् पर एक संक्षिप्त निबंध लिखिए।
5. टेलीफोन के ग्राहक के निर्माण में स्थायी चुंबक का प्रयोग क्यों किया जाता है?
   दो स्टेशनों के बीच सामान्य टेलीफोन के संबंध पर प्रकाश डालिए।
6. योजित्र (relay) प्रणाली और क्रिया प्रणाली का क्या उपयोग है?
   माइक्रोफ़ोन की रचना पर प्रकाश डालिए।

पंचम प्रकरण

आधुनिक भौतिक-विज्ञान

(MODERN PHYSICS)

अध्याय 1

कैथोड रश्मियाँ और X-किरणें
(Cathode Rays, X-Rays)

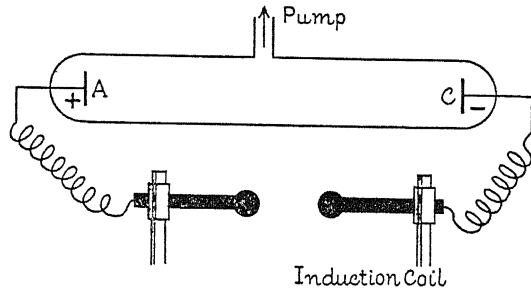
1.1. गैस में विद्युत् विसर्जन (Discharge Through Gases)—

किसी भी माध्यम में विद्युत् प्रवाह आवेशित कणों द्वारा होता है। ठोस सुचालकों में मूल परमाणुओं से अलग हुये मुक्त इलैक्ट्रन ही विद्युत वाहक (carrier) का कार्य करते हैं। ठोस धातुओं में बिना किसी वाह्य साधन के ही ये मुक्त इलैक्ट्रन सदैव उपस्थित रहते हैं। तरल पदार्थों (द्रव और गैस) में विद्युत् प्रवाह आयनों (ions) के द्वारा होता है। तरल माध्यम का प्रत्येक अणु (molecule) स्वत: अथवा किसी वाह्य कारण से दो भागों में टूट जाता है। धनोवशित भाग को धनायन (Positive ion) और ऋणोवशित भाग को ऋणायन (Negative ion) कहते हैं। एक परमाणु (monoatomic) गैसों में ऋणायन एक मुक्त (free) अथवा अन्य उदासीन (neutral) परमाणु से संलग्न (attached) इलैक्ट्रन होता है। विद्युद्विश्लेष्य रसायनों (electrolytic chemicals) के द्रव घोलों में तो आयनिक विश्लेषण (ionic dissociation) की रीति से अपने आप ही आयन उत्पन्न हो जाते हैं। साधारण अवस्था में गैसें विद्युत अचालक होती हैं। उनकी चालकता बढ़ाने के लिये किसी वाह्य शक्तिशाली साधन से आयनीकरण (ionization) उत्पन्न किया जाता है। जगत किरणें (Cosmic rays), *X*-किरणें, रेडियो धर्मी किरणें (Radio active rays) आदि ऐसे साधन हैं जिनकी सहायता से गैस-परमाणुओं को आवश्यक ऊर्जा प्रदान करके संयोजकता (Valency) इलैक्ट्रनों को मूल परमाणु से अलग किया जा सकता है। जिस परमाणु से इलैक्ट्रन अलग हो जाते हैं एक अनायन (+) बन जाता है और च्युत इलैक्ट्रन स्वयं अथवा किसी अन्य सदासीन परमाणु पर चिपककर ऋणायन बनाता है। इस समय यदि गैस में दो विद्युद्वारों (Electrodes) की सहायता से विभवान्तर (*P.D.*) उत्पन्न कर दिया जाय तो धनायन ऋणाग्र की ओर तथा ऋणायन धनाग्र की ओर चलने लगते हैं। इसी से विद्युत प्रवाह होता है। मौका मिलने पर अनुकूल परिस्थिति में एक धन आयन (Positive ion) किसी मुक्त इलैक्ट्रन को पकड़ कर साधारण उदासीन परमाणु में बदल जाता है। परन्तु इस संयोजन (combination) की प्रक्रिया में उष्मा (heat) अथवा प्रकाश (light) के रूप में उतनी ही ऊर्जा मुक्त (liberate) होती है जितनी ऊर्जा के प्रदान से इलैक्ट्रन को मूल परमाणु से अलग किया गया था। इससे विद्युत् विसर्जन की उत्पत्ति होती है।

विभवान्तर आरोपित करने पर गैस में उपस्थित आयन विपरीत विद्युद्वारों की ओर आकर्षित होने से गतिज ऊर्जा प्राप्त करते हैं। रास्ते में मिलने वाले परमाणुओं से टकराकर उन्हें आयनित (ionised) भी कर सकते हैं यदि उनमें पर्याप्त गतिज ऊर्जा है। और इस प्रकार नवजात आयन भी विपरीत विद्युद्वारों की ओर बढ़ने लगते हैं। दूसरे परमाणु से टकराने के पहले ही यदि उनमें काफी गतिज ऊर्जा उत्पन्न हो जाय तो वे भी अन्य अतिरिक्त आयन उत्पन्न कर सकते हैं। इस प्रकार आयनों की संख्या बढ़ती जाती है और स्फुलिंग (spark) उत्पन्न हो जाता है।

साधारण दबाव पर परमाणुओं के बीच बहुत कम फासला रहता है। अत: एक आयन पर्याप्त गतिज ऊर्जा प्राप्त करने के पहले ही दूसरे परमाणु से टकरा जाता है। अतिरिक्त आयन उत्पन्न नहीं हो पाते। इसी बीच में यदि धनायन की भेंट किसी इलैक्ट्रन से हो गई तो वह स्वयं भी साधारण निरावेशित परमाणु में बदल जाता है। साधारण विभवान्तर पर ऊँचे दबाव की गैस में विद्युत् प्रवाह असम्भव है। विद्युत प्रवाह होगा भी तो बहुत ऊँचे विभवत्व पर। साधारण दबाव की वायु की एक सें० मी० लम्बाई में विद्युत् विसर्जन के लिये 20,000 वोल्ट विभवान्तर की आवश्यकता है।

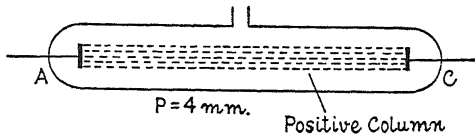
दबाव घटने पर गैस परमाणुओं के बीच की दूरी बढ़ जाती है। कोई आयन काफी दूर चलने के बाद किसी परमाणु से टकरा पाता है। और इस दौरान में उस पर गतिज ऊर्जा का मान भी काफी बढ़ जाता है। इससे आयन की प्रत्येक टक्कर में नवीन आयनों की उत्पत्ति होती है। दबाव घटाने से इसीलिये नीचे विभवान्तर पर ही विद्युत विसर्जन सुगमता से हो जाता है।

1.2. **नीचे दबाव पर विद्युत विसर्जन (Discharge at Low Pres-**

चित्र 1

sure)—विसर्जन नलिका की घटना के अध्ययन के लिये चित्र 1 की भांति लगभग 30 सें० मी० लम्बे कांच की नलिका (tube) में एक शून्य पम्प की सहायता से धीरे-धीरे

वायु निकाल कर दबाव कम करते जाते हैं और उसके सिरों पर लगे अलूमीनियम के विद्युद्वारों A, C. को प्रेरण कुंडल (Induction coil) के द्वैतीयक के प्रधान चालकों (Prime conductors) से जोड़ देते हैं। A धनाग्र (Anode) है और C ऋणाग्र (Cathode)।

(i) प्रथम अवस्था में तो कोई विसर्जन नहीं होता। परन्तु जब वायु दबाव लगभग 1 सें० मी० (पारा-स्तम्भ) हो जाता है तो नली में एक इलैक्ट्रोड से दूसरे की ओर एक पतली बैंजनी-लाल रंग की प्रकाशमय टेढ़ी मेढ़ी रेखायें चलने लगती हैं। करड़ करड़ का शब्द भी सुनाई देता है।

(ii) दबाव और घटाने से यह शब्द लुप्त हो जाता है और समस्त नलिका धनाग्र से ऋणाग्र तक प्रकाश मय विसर्जन से भर जाती है। यह प्रकाश एक स्तम्भ की भांति

चित्र 2

होता है। इसे "धन-स्तम्भ" (Positive column) कहते हैं। प्रकाश का रंग नलिका में भरी गैस पर निर्भर करता है।

गैस	रंग	गैस	रंग
वायु	चमकीला गुलाबी	हाइड्रोजन	नीला या लाल
नाइट्रोजन	लाल	हीलियम	गुलाबी
नियन (Neon)	गहरा लाल	कार्बन डाइआक्साइड	सफेद
क्लोरीन	हरा		

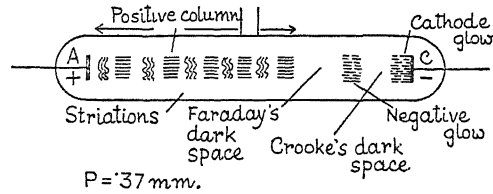
विज्ञापन के लिये प्रयुक्त होने वाली गीस्लर नलिकाओं (Geissler Tubes) में धन-स्तम्भ का प्रकाश ही होता है।

व्याख्या—जैसे ही धनायन ऋणाग्र (Cathode) पर टक्कर लगाते हैं उससे इलैक्ट्रन निकलते हैं। धनाग्र के आकर्षण से इलैक्ट्रन शीघ्र ही वेग प्राप्त कर लेते हैं और मार्ग में आने वाले परमाणुओं को आयनीकृत (ionized) कर देते हैं। पुनः संयोजन (recombination) की क्रिया भी साथ-साथ चलती रहती है। धनायन इलैक्ट्रन को पकड़ कर उदासीन हो जाते हैं और प्रकाश के रूप में ऊर्जा का विकरण करते हैं। क्योंकि विभिन्न गैसों के लिये इस मुक्त ऊर्जा का परिमाण भिन्न होता है अतः उससे निकलने वाले प्रकाश का रंग (colour) भी भिन्न होता है।

(iii) लगभग 1·65 मि० मी० दबाव पर ऋणाग्र से तेज नीला प्रकाश उत्पन्न होता है जिसे **"ऋणात्मक चमक"** (Negative Glow) कहते हैं। धन स्तम्भ और

ऋणात्मक चमक के बीच एक अपेक्षाकृत अन्धकारमय प्रदेश होता है। इसे **"फैरेडे का अंधेरा प्रदेश"** (Faraday's dark space) कहते हैं।

(iv) लगभग 0·8 मि० मी० दबाव पर ऋणात्मक चमक कैथोड को छोड़ देती है। उसके और ऋणाग्र के बीच एक दूसरा अंधेरा प्रदेश, **"क्रुक का अंधेरा प्रदेश"** (Crook's dark space) प्रकट होता है।

(v) जब दबाव लगभग 0·37 मि० मी० हो जाता है तो धन-स्तम्भ प्रकाशित

चित्र 3

चकरियों में टूट जाता है जिन्हें स्ट्राय (striae) कहते हैं (चित्र 3)। अंधेरे प्रदेशों से अलग की हुई प्रकाश मय चकरियां होती हैं।

(vi) और दबाव घटाने से धन स्तम्भ की लम्बाई कम हो जाती है। 0.1 मि० मी० दवाब पर धन स्तम्भ प्राय: विलुप्त हो जाता है।

(vii) .02 मि० मी० दबाव पर क्रुक का अंधेरा प्रदेश ही सारी नलिका को भर लेती है। कैथोड के सामने वाला नलिका का भाग प्रतिदीप्त (Fluorescent) हो जाता है। इसका कारण कैथोड से निकलने वाली अदृश्य किरणें हैं जो नलिका की दीवार में कांच के अणुओं को उत्प्रेरित करके प्रतिदीप्ति उत्पन्न करती हैं जिसका रंग कांच की प्रकृति पर निर्भर करता है। सीसा कांच (lead glass) के लिये नीला और सोडा कांच के लिये पीला-हरा प्रकाश उत्पन्न होता है। कैथोड़ से निकलने वाली इन किरणों को "कैथोड रश्मियां" (Cathode Rays) कहते हैं। प्रयोगों द्वारा यह सिद्ध हो चुका है कि "कैथोड रश्मियों" में ऊँचे वेग से चलने वाले इलैक्ट्रन ही होते हैं।

(viii) इससे आगे दबाव घटाने से विद्युत विसर्जन असम्भव है। इससे स्पष्ट है कि विद्युत प्रवाह के लिये पदार्थीय माध्यम की उपस्थिति अनिवार्य है।

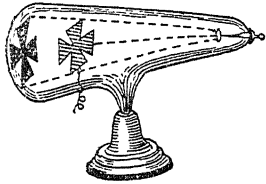
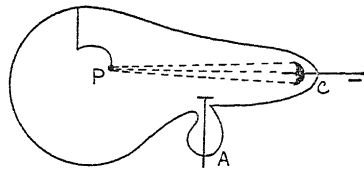
1.3. **कैथोड रश्मियाँ (Cathode Rays)**—लगभग ·02 या ·01 मि० मी० दबाव पर क्रुक का अंधेरा प्रदेश ही विस्तृत होकर समस्त नलिका को भर लेता है। नीचे दबाव और ऊँचे विभवत्व की इस अवस्था में धनायन बड़े ऊँचे वेग से कैथोड पर टकराते हैं और इलैक्ट्रन बड़ी भारी संख्या में निकलने लगते हैं। उत्पत्ति के फौरन बाद ही ये इलैक्ट्रन धनाग्र (anode) की ओर दौड़ते हैं। बहुत शीघ्र ही ऊँचे विभत्व के कारण उनका वेग इतना बढ़ जाता है कि नलिका की दीवार से टकराने पर कांच

के परमाणुओं के बाहरी कवच (shell) के इलैक्ट्रनों को स्थानान्तरित कर देते हैं। पूर्व अवस्था में लौटते समय कांच के परमाणु प्रतिदीप्ति के रूप में प्रकाश निकालते हैं।

कैथोड से निकलने वाले ये इलैक्ट्रन ही सर्वप्रथम आविष्कार के समय **"कैथोड रश्मियाँ"** (Cathode rays) कहलाते थे।

1.4. कैथोड रश्मियों के गुण--

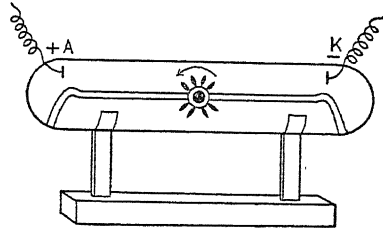
(i) नलिका की कांच की दीवारों में, बेरियम प्लेटीनो साइनाइड तथा कुछ सल्फाइड और सल्फेटों में प्रतिदीप्ति (fluorescence) उत्पन्न करती हैं।

(ii) ऋजु रेखाओं में चलती हैं। कैथोड के सामने लटके हुए अभ्रक (mica) के स्वस्तिका चिह्न (cross) की स्पष्ट छाया नलिका की दीवार पर बन जाती है। (चित्र 4)।

चित्र 4

चित्र 5

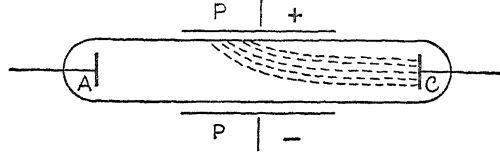
(iii) कैथोड के धरातल से लम्बवत् (normally) निकलती है और उनके चलने की दिशा पर धनाग्र की स्थिति का कोई प्रभाव नहीं पड़ता।

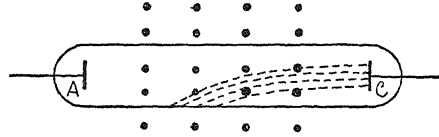
(iv) कैथोड को अवतल (concave) बना कर उनको केन्द्रीभूत किया जा सकता है (चित्र 5)।

(v) जब किसी पदार्थ पर गिरती है, तो उष्मा उत्पन्न होती है। चित्र 5 में अवतल कैथोड C के केन्द्र पर रखी प्लेटीनम की पत्ती P है। रश्मियों के गिरने से P गर्म हो कर लाल हो जाती है। चित्र 5 गुण संख्या (iii), (iv) और (v) को अच्छी प्रकार प्रदर्शित करता है।

(vi) यांत्रिक दबाव (mechanical pressure) डालती है। जब कैथोड रश्मियाँ अभ्रक के पैडिल युक्त (Paddled) पहिये पर गिरती है, तो पहिया (चित्र 6) की भाँति कैथोड से दूर हटने लगता है। नलिका के इलैक्ट्रोड बदल देने से पहिया विपरीत दिशामें चलनेलगता है।

चित्र 6

(vii) चुम्बकीय अथवा विद्युत् क्षेत्र आरोपित करने से अपने मार्ग से विचलित हो जाती हैं।

(a) यदि रश्मियों के मार्ग के लम्बवत् विद्युत् क्षेत्र आरोपित किया जाय, तो उनका मार्ग इस प्रकार मुड़ जाता है जैसे ऋणावेशित कण कैथोड से चल रहे हों। (चित्र 7)

चित्र 7

चित्र 8 की भाँति यदि रश्मियाँ दायें से बायें चले और उनके लम्बवत् काग़ज़ के तल से पाठक (reader) की दिशा में एक चुम्बकीय क्षेत्र आरोपित किया जाय, तो रश्मियाँ काग़ज़ के तल में नीचे की ओर झुक जाती हैं।

चित्र 8

फ्लैमिंग के बायें हाथ के नियम से परीक्षा करने पर यह स्पष्ट हो जाता है कि C से A की ओर जानेवाली कैथोड रश्मियाँ A से C की ओर चलनेवाली विद्युत् धारा के समतुल्य है।

इन दोनों प्रयोगों से स्पष्ट है कि कैथोड रश्मियाँ ऋणात्मक कणों की बौछार के रूप में कैथोड से निकलती हैं।

(viii) टाम्सन (Thomson) ने एक प्रयोग में उपयुक्त चुम्बकीय क्षेत्र से विक्षेपित करके कैथोड रश्मियों को एक इलैक्ट्रेस्कोप से सम्बन्धित धातु के बेलन (फैरेडे बेलन) पर डाला। विद्युत् दर्शी के विक्षेप से यह निस्सन्देह स्पष्ट हो गया कि कैथोड रश्मियाँ ऋणावेशित कणों से मिल कर बनी हैं।

(ix) ज्ञात तीव्रता के विद्युत् क्षेत्र में तथा विद्युत् और चुम्बकीय क्षेत्रों के संयुक्त प्रभाव में विक्षेप मापन करके जे० जे० टाम्सन ने ज्ञात किया कि कैथोड रश्मियों में उपस्थित कणों का ऋणावेश $4{\cdot}801 \times 10^{-10}$ *e.s.u.* और संहति $9{\cdot}0 \times 10^{-28}$ ग्राम अर्थात् हाइड्रोजन परमाणु भार का 1/1847 वाँ भाग है। इन कणों को इलैक्ट्रन (Electron) का नाम दिया गया।

(x) नलिका के इलैक्ट्रोड अथवा/तथा गैस बदल देने पर भी कैथोड रश्मि के कणों (इलैक्ट्रन) की प्रकृति में कोई अन्तर नहीं आता। इससे स्पष्ट है कि इलैक्ट्रन

सब पदार्थों में उपस्थित रहते हैं। वास्तव में इलैक्ट्रन प्रत्येक परमाणु की रचना में "मौलिक कण" (fundamental particle) का कार्य करता है।

(xi) रासायनिक क्रिया में भी अवकारक (reducing agent) का कार्य करती है।

(xii) ऊँचे द्रवणांक और संहति क्रमांक (mass number) वाले पदार्थों जैसे प्लैटीनम, टंग्सटन, मौलिवडिनम आदि पर आपतित हो कर X-किरणें उत्पन्न करती है।

उपयोगिता—

(i) **कैथोड रश्मि भट्टियाँ—**उपयुक्त ढंग से बनाई गई कैथोड रश्मि नलिका के अवतल कैथोड के केन्द्र पर सिलिका की प्याली (crucible) में ऊँचे द्रवणांक के पदार्थ रख कर आपतित किरणों के उष्मीय प्रभाव से पिघलाया जा सकता है।

(ii) विज्ञापन अथवा सजावट के लिये गीस्लर नलिकायें प्रयुक्त होती है।

(iii) **कैथोड रश्मि सूक्ष्मदर्शी—**इनकी तरंग प्रकृति (wave nature) का लाभ उठा कर बहुत ही अच्छे सूक्ष्मदर्शी यन्त्र की रचना की गई है जिसमें तालों (lens) के स्थान पर विद्युत् और चुम्बकीय क्षेत्रों द्वारा किरणों को केन्द्रीभूत किया जाता है।

1.5. **X-किरणें (X-rays)—**सन् 1895 ई० में कैथोड रश्मि नलिका से कार्य करते समय प्रौफेसर रोंजन (Rontgen) ने देखा कि नलिका के पास रखी हुई फोटो ग्राफिक प्लेट प्रभावित हो जाती है। रोंजन ने इसका कारण नलिका से निकलनेवाली अज्ञात रश्मियाँ बताया। इनकी प्रकृति अज्ञात होने के कारण इनको X-किरणे (X-rays) कहा गया। रोंजन के नाम पर इनको रोंजन-किरणें (Rontgen-rays) भी कहते हैं।

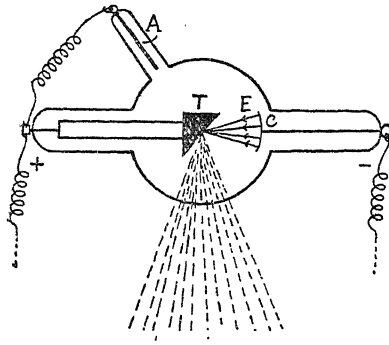
बाद के प्रयोगों से यह ज्ञात हुआ है कि ऊँचे वेग से चलनेवाले इलैक्ट्रन (कैथोड-रश्मियाँ) जब भी किसी पदार्थ पर, विशेषतया ऊँचे परमाणु भार वाली धातु के टुकड़े पर गिरते हैं तो X-किरणें सर्वदा उत्पन्न होती है। साधारण प्रकाश तरंगों की भाँति X-किरणें भी विद्युत्-चुम्बकीय तरंग (Electro-magnetic waves) है। दृश्य तरंगों का तरंग दैर्ध्य 7800 $A.U.$ से 3800 $A.U.$ होता है, परन्तु X-किरणों का तरंग दैर्ध्य 3 $A.U.$ से 1 $A.U.$ अथवा उससे भी कम होता है।

1.6. X-किरणों का उत्पादन (Generation)—

(1) **प्रारम्भिक नलिका—**पहले पहल X-किरणों के उत्पादन के लिये चित्र 9 में दिखाई गई काँच की नलिका से X-किरणें उत्पन्न की जाती थीं। नलिका के विशेष अंग निम्न हैं—

(a) अच्छे काँच के एक बल्ब में तीन नलिकायें लगी हैं।

(b) एक नलिका में एलूमीनियम का अवतल कैथोड C है।

(c) दूसरी नलिका में C से निकलनेवाली कैथोड रश्मियों के मार्ग से 45° पर झुका हुआ T एक लक्ष्य (Target) है। यह लक्ष्य या प्रतिकैथोड (Anti-cathode) टंग्सटन, प्लैटीनम या मौलिब्डिनम जैसी ऊँचे द्रवणांक और ऊँचे परमाणु भार वाली धातु का बना होता है। आपतित कैथोड किरणों की लगभग समस्त ऊर्जा उष्मा में ही परिणत होती है। अतः लक्ष्य को ठंडा करने का भी प्रबन्ध रहता है। ठंडे पानी की धारा से अथवा वायु धारा से T की उष्मा बाहर निकाली जाती है।

चित्र 9

(d) तीसरी नलिका में A एक और इलैक्ट्रोड है, जो बाहर से प्रति-कैथोड (anti-cathode) से जुड़ा रहता है। इसे ऐनोड (Anode) कहते हैं। इसकी वास्तविक क्रिया अभी तक ज्ञात नहीं हो सकी है, परन्तु इतना अवश्य है कि A के लगाने से X-किरणों का उत्पादन सुगम हो जाता है।

(e) X-किरण नलिका में गैस का दबाव 10^{-2}—10^{-3} मि० मी० के लगभग होता है। इस अवस्था में कैथोड से ऐनोड तक समस्त नलिका क्रुक के अंधेरे प्रदेश से भर जाती है।

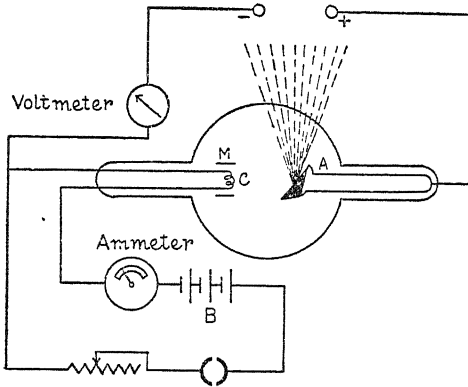
कार्य-विधि—(i) एक प्रेरण कुंडल की सहायता से लगभग 100,000 वोल्ट का विभवत्व आरोपित करने से कथोड C से निकलनेवाली कैथोड रश्मियाँ लक्ष्य (T) पर केन्द्रीभूत हो कर टकराती हैं। फौरन ही नलिका के निचले भाग में प्रतिदीप्ति (fluorescence) प्रकट होती है और X–किरणें बाहर निकलने लगती हैं।

(ii) प्रेरण कुंडल से शुद्ध एक दैशीय विभवान्तर प्राप्त नहीं होता अतः उसके परिपथ में एक ऋजुकारी (Rectifier) लगाया जाता है।

(iii) कार्य करते समय नलिका में गैस का दबाव बहुत कम हो जाता है। उस समय विसर्जन गुज़ारने के लिये उत्तरोत्तर ऊँचा विभवत्व लगाना पड़ता है। इस कठिनाई को दूर करने के लिये नलिका में एक पैलैडियम की छड़ लगी रहती है। बर्नर से गर्म करने पर छड़ कुछ हाइड्रोजन गैस अवशोषित (absorsb) कर लेती है, जो नली में जा कर दबाव बढ़ा देती है और मुख्य नलिका में विसर्जन होने लगता है।

(iv) X–किरणों की घनता (Intensity) बढ़ाने के लिये विभवान्तर बढ़ा कर ही आपतित कैथोड रश्मियों में इलैक्ट्रनों की संख्या बढ़ाई जा सकती है। परन्तु विभवान्तर बढ़ाने से X–किरणों की ऊर्जा (Energy) भी बढ़ जाती है। अतः

इस प्रकार की X–किरण नलिका में यह दोष है कि इसमें X–किरणों की घनता और ऊर्जा का अलग-अलग परस्पर स्वतन्त्र नियन्त्रण (Control) नहीं हो सकता।

2. **आधुनिक कूलिज (Coolidge) X–किरण नलिका**—इस नलिका में कैथोड C टंग्सटन का तन्तु (filament) होता है जिसमें एक बैटरी B से नियन्त्रित

चित्र 10

धारा बहती है। धारा के उष्मीय प्रभाव से तन्तु गर्म हो कर इलैक्ट्रन निकालने लगता है। X–किरण बल्ब में दबाव इतना कम कर दिया जाता है कि उसमें विद्युत् विसर्जन न हो सके।

प्रतिकैथोड A और C के बीच एक प्रेरण कुंडल के द्वैतीयक से जोड़ कर लगभग 20,000 वोल्ट का विभवान्तर आरोपित करते हैं। केवल उसी समय तन्तु से निकल कर इलैक्ट्रन लक्ष्य A से टकराते हैं और X–किरणें उत्पन्न करते हैं जब कि C की अपेक्षा A धनात्मक है। इस प्रकार नलिका स्वत: एक ऋजुकारी (Rectifier) का कार्य करती है।

तन्तु में बहनेवाली धारा को बढ़ा कर C का ताप और इसलिये उससे निकलनेवाले इलैक्ट्रनों की संख्या बढ़ा कर उत्पन्न होनेवाली X–किरणों की घनता (Intensity) बढ़ा सकते हैं। इसका उनकी ऊर्जा पर कोई प्रभाव नहीं होगा। A और C के बीच विभवत्व का मान बढ़ा कर आपतित इलैक्ट्रनों का वेग और इससे X–किरणों की ऊर्जा बढ़ाई जा सकती है। इस प्रकार इस प्रकार की नलिका में घनता और ऊर्जा (energy) का परस्पर स्वतन्त्र नियन्त्रण सम्भव है, जो पहली नलिका में असम्भव था।

1.7. **X–किरणों के गुण**—

(i) सीधी रेखा में चलती हैं।

(ii) चुम्बकीय और विद्युतीय क्षेत्रों का इनके मार्ग पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता। अतः X–किरणें आवेशित कणों से मिल कर नहीं बनी हुई होती।

(iii) वास्तव में X–किरणें भी साधारण प्रकाश तरंगों की भाँति परावर्त्तन (reflection), विवर्त्तन (diffraction), व्यतिकरण (interference) और ध्रुवण (Polarization) की घटनायें प्रदर्शित करती हैं। अतः ये भी विद्युत् चुम्बकीय विकरण तरंगें हैं।

(iv) वास्तविक प्रयोगों द्वारा यह ज्ञात हुआ कि X–किरणों का तरंग दैर्घ्य 1 और 3 $A.U.$ के बीच रहता है। जब कि दृश्य प्रकाश तरंगों का तरंग दैर्घ्य 3800 से 7900 $A.U.$ तक होता है।

(v) फोटोग्राफिक प्लेट पर प्रभाव डालती हैं। बल्कि साधारण प्रकाश की अपेक्षा अधिक क्रियाशील होती है।

(vi) जिस गैस से गुज़रती हैं उसे आयनित (ionized) कर देती हैं।

(vii) X–किरणें बहुत से उन ठोसों में होकर भी निकल जाती हैं जो दृश्य प्रकाश के लिये अपार दर्शक (opaque) है। जैसे लकड़ी, चमड़ा, मांस, अलूमीनियम, काग़ज़ आदि। परन्तु ऊँचे घनत्व वाले पदार्थों में होकर ये नहीं निकल पातीं जैसे सीसा (lead), हड्डी आदि।

फोटोग्राफिक प्लेट और X–किरण-स्रोत के बीच हाथ रखने से मांसवाले भाग से निकलनेवाली किरणें अधिक और हड्डियोंवाले भाग में से निकलनेवाली किरणें कम प्रभाव डाल पाती हैं। इस प्रकार हाथ के ऋणात्मक चित्र (negative photograph) में मांस वाला भाग हल्का और हड्डियोंवाला भाग गहरा आता है।

(viii) छोटे तरंग दैर्घ्य की X–किरणें अधिक गहराई पार कर जाती है अतः उन्हें कठोर (hard) X–किरणें और बड़े तरंग दैर्घ्य वाली किरणों को कोमल (Soft) X–किरणें कहते हैं।

X–किरणों की उपयोगिता—

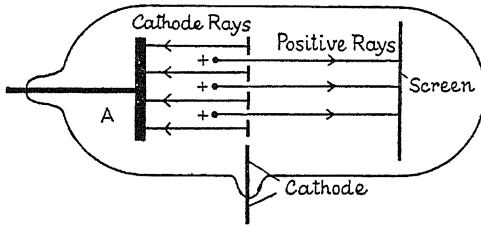
(i) हड्डियों की अपेक्षा मांस में होकर अधिक सुगमता से पार हो जाने और फिर फोटोग्राफिक प्लेट पर प्रभाव डाल सकने के गुण का लाभ उठा कर शल्य चिकित्सा (Surgery) में प्रयुक्त होती हैं। बिना चीड़-फाड़ किये ही X–किरण फोटोग्राफ अर्थात् रेडियोग्राफ (Radiograph) की सहायता से यह पता लग जाता है कि शरीर के किस स्थान पर हड्डी टूटी है अथवा किस जगह कोई बाह्य पदार्थ जैसे सीसे का दर्रा आदि है।

(ii) क्षय रोग के कारण फेफड़े खराब हो जाते हैं। X–किरण फोटोग्राफ में क्षय रोगी के फेफड़ों में कुछ-कुछ काले धब्बे आ जाते हैं। इस प्रकार रोग का निदान होने से चिकित्सा भी ठीक हो जाती है।

(iii) केन्सर के इलाज में भी X–किरणें प्रयुक्त होती हैं। बाहरी केन्सर के लिये कोमल (Soft) और अन्दर गहराई में स्थित केन्सर के लिये कठोर (Hard) X–किरणें प्रयुक्त की जाती हैं। X–किरण के आघात से रुग्ण कोशिकाएें (diseased cell) नष्ट हो जाते हैं।

(iv) धातु की छड़ों के अन्दरूनी भागों में स्थित दरार, छेद अथवा अन्य कोई दोष X–किरणों की सहायता से ज्ञात हो सकता है। दोष के सामने वाला प्लेट का भाग X–किरणों से अधिक प्रभावित होता है।

(v) विभिन्न पदार्थों के लक्ष्य लेकर उनसे उत्पन्न होने वाली X–किरणों से किसी भी रवे (crystal) में परमाणुओं के आपेक्षिक संगठन का अध्ययन कर सकते हैं। इन प्रयोगों में रवा (crystal) एक "ग्रेटिंग" (Grating) की भांति कार्य करता है। स्थिर रवे पर X–किरण डालने से फोटोग्राफ में कुछ बिन्दु आते हैं जिन्हें लवे स्पाट (Laue spot) कहते हैं। X–किरण पुंज में घूमते हुये तथा चलते हुये रवों से भी विवर्तन फोटोग्राफ (diffraction photograph) लिये जाते हैं।

1.8. **धनात्मक किरणें (Positive rays) या धनाग्र (Anode) किरणें**—यदि शून्य नली में लगे हुये कैथोड में छेद करदें तो कुछ किरणें उन छेदों में से पीछे निकलने

चित्र 11

लगती हैं। चित्र 11 में यह बिल्कुल स्पष्ट प्रदर्शित है। सर्वप्रथम इनको गोल्ड-स्टीन ने देखा था और क्योंकि ये कैथोड में बने छिद्रों से निकलती हैं अतः इनको (Canal rays) का नाम दिया गया।

गुण—(i) यह धनावेशित कणों से बनी होती हैं।

(ii) धनात्मक किरणों के कणों की संहति नलिका में भरी गैस के परमाणुओं की संहति के लगभग बराबर होती है।

(iii) चुम्बकीय और विद्युतीय क्षेत्रों से विचलित होती हैं। फ्लैमिंग के बायें हाथ के नियमानुसार इन पर धनावेश ही पाया जाता है।

(iv) वास्तव में ये गैस के धनायन (Positive ions) ही होते हैं।

सारांश

यदि किसी विसर्जन-नली में गैस का दबाव धीरे-धीरे कम किया जाता है तो क्रमवत् निम्न प्रक्रियाएँ होती हैं (i) प्रकाश-विहीन विसर्जन (ii) धन-स्तंभ (Positive column) (iii) ऋणात्मक चमक (Negative glow) (iv) फ़ैराडे का अंधेरा प्रदेश, (v) क्रुक का अंधेरा प्रदेश, (vi) प्रकाशित चकरियां (Striations), (vii) कैथोड किरणों का उत्पादन।

कैथोड किरणें वास्तव में इलेक्ट्रानों के समूह होती हैं। ये नली की दीवालों पर कांच की प्रकृति के अनुसार प्रतिदीप्ति उत्पन्न करती हैं। जब ये किरणें, किसी पदार्थ, विशेषत: ऊँचे परमाणु भार वाली धातु के किसी टुकड़े पर टकराती हैं, तो एक्स-रश्मियां उत्पन्न होती हैं। इनकी तरंग-दैर्ध्य सामान्यत: 1 से 3 *A.U.* होती है। एक्स-रश्मियां दो प्रकार की नलिकाओं से सामान्यत: उत्पन्न की जाती हैं, (i) विसर्जन-नली, जिसमें से कैथोड रश्मियां एक अवतल ऋणाग्र से निकलकर किसी धातु के टुकड़े पर टकराती हैं, (ii) कूलिज नली, जिसनें किसी आक्साइड रोपित तंतु (Filament) को तप्त करने से कैथोड किरणें निकलती हैं। ये किरणें खाल में से निकल जाती हैं, उद्योगों आदि में इनका बहुत उपयोग है। रासायनिक विश्लेषण म भी इनका बहुत उपयोग किया गया है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. एक नलिका में लगे हुये धातु के इलैक्ट्रोडों के बीच विद्युत् विसर्जन गुजरते समय नलिका की गैस के विभिन्न दबाव की अवस्थाओं में क्या-क्या घटनायें होती हैं सविस्तार लिखिये।
2. कैथोड रश्मियों की उत्पत्ति और उनके गुणों का विस्तृत वर्णन कीजिये।
3. *X*–किरण उत्पन्न करने वाली आधुनिक नलिका की रचना और कार्य विधि समझाइये। *X*–किरणों के गुण और उपयोगिता पर भी प्रकाश डालिये।
4. एक शीशे की नली में एक पार्श्व-नली लगी है, जो एक वायु-पंप से संबद्ध है, जिसके सिरे दो विद्युद्वारों से आयुक्त हैं। नली में से विद्युत्-विसर्जन किस प्रकार गुजारोगे ? जब निर्वात पंप (exhaust pump) कार्य करता है, तो क्या होता है ?
5. धनात्मक किरणों (Positive ray) से क्या अभिप्राय है ? यह कैथोड रश्मियों से किस प्रकार भिन्न होती हैं ?

अध्याय 2

बेतार की टेलीग्राफी और टेलीफोनी

(Wireless Telegraphy and Telephony)

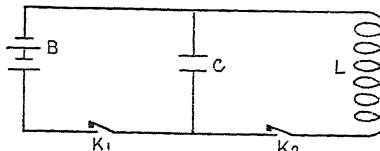
2.1. साधारण टेलीग्राफ़ी में मोर्स कुंजी (Morse Key) की सहायता से थोड़ी या अधिक देर विद्युत धारा बहाकर दूसरे स्थान पर रखे हुये ध्वानित्र (Sounder) में डौट (dot) या डैश (dash) उत्पन्न करके समाचार भेजे जाते है। परन्तु इस धारा के लिये तार की आवश्यकता होती है।

बेतार की टेलीग्राफी में विना तार के ही विद्युत-चुम्बकीय विकरण तरंगों की सहायता से संकेत भेजे जाते हैं।

केवल सैद्धान्तिक ढंग पर मैक्सवैल (Maxwell) ने अपने प्रसिद्ध समीकरणों [मैक्सवैल समीकरण (Maxwell Equations)] की सहायता से यह स्थापित किया कि जब किसी परिपथ में विद्युतीय अथवा चुम्बकीय क्षेत्र किसी आवृति से बदलता है तो उसी समय निर्वात आकाश में विद्युत चुम्बकीय तरंगें उत्पन्न हो जाती हैं जो प्रकाश के वेग से चलती हैं।

हर्टज़ (Hertz) ने इन विद्युत चुम्बकीय तरंगों को प्रयोगशाला में उत्पन्न और ग्रहण (Receive) किया तथा वेग ज्ञात किया। वेग का मान प्रकाश-वेग के बराबर 3×10^{10} सें० मी०/से० आया।

मार्कोनी ने हर्टज़ के प्रयोग में कुछ संशोधन करके बेतार की टेलीग्राफी (Wireless Telegraphy) की नींव डाली।

2.2. **विद्युतीय दोलन (Electrical oscillations)**—चित्र 12 में दिखाये गये एक ऐसे विद्युत परिपथ पर विचार कीजिये जिसमें प्रेरकत्व (Inductance) L और धारिता (Capacity) C समानान्तर क्रम में लगे हैं। K_1 को दबाकर धारित्र C को आवेशित करके K_1 को खोल दीजिये। धारित्र की दोनों प्लेटों के बीच एक स्थिर विद्युतीय क्षेत्र (Electro Static Field) स्थापित होता है।

चित्र 12

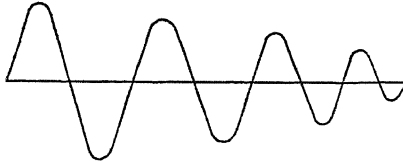
बैटरी से निकलकर कुछ ऊर्जा धारित्र में क्षेत्र के तनाव के रूपमें एकत्रित हो जाती है।

अब K_2 को दबाइये। L में होकर धारित्र C अपने को निरावेशित करने का प्रयत्न करेगा। साधारण अवस्था में तो धारा केवल उतने ही समय तक बहती जब

तक कि धारित्र की दोनों प्लेटों का विभव एक नहीं हो जाता। परन्तु L के कारण यह धारा प्रवाह उस अवस्था से और भी आगे तक जारी रहता है। नीचे विभव वाली प्लेट धनात्मक और ऊँचे विभव वाली प्लेट ऋणात्मक हो जाती है। अतः अब विपरीत दिशा में धारा प्रवाह होने लगता है।

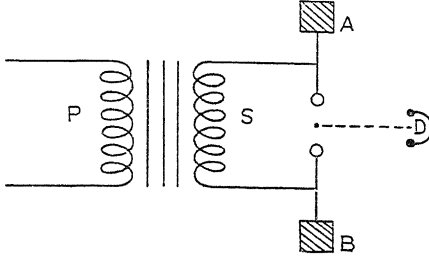
परिपथ की धारा का यह दोलन तब तक ज़ारी रहेगा जब तक कि समस्त ऊर्जा उष्मा के रूप में खो नहीं जाती। परन्तु क्योंकि परिपथ में सदैव प्रतिरोध उपस्थित रहता है अतः हमेशा कुछ न कुछ उष्मा उत्पन्न होती रहेगी और धारा के दोलनों का आयाम (amplitude) लगातार घटता जायेगा।

इस प्रकार के दोलनों को अवमंदित (damped) दोलन कहते हैं। इन के फल-स्वरूप उत्पन्न होने वाली विद्युत चुम्बकीय तरंगोंको अवमंदित तरंग (damped waves) कहते हैं। इन दोलनों की आवृत्ति $\frac{1}{2\pi\sqrt{T}}C$ के बराबर होती है और यही आवृत्ति परिणामित विद्युत चुम्बकीय तरंगों की होती है। परन्तु इन तरंगों को अधिक दूर तक नहीं भेजा जा सकता। इस विवेचना से स्पष्ट है कि विद्युत दोलन के लिये L का व्यवहार जड़त्व (Inertia) के समान है और $1/C$ का व्यवहार प्रत्यास्थता (elasticity) के तुल्य है।

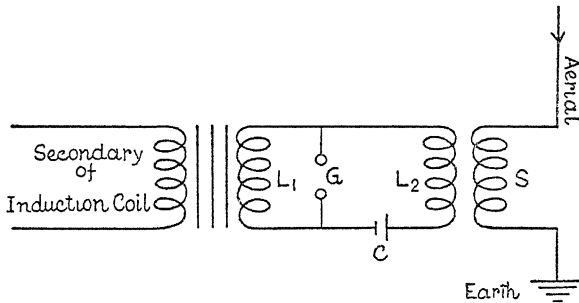
यदि इस LC परिपथ में एक वायु अन्तर (air gap) भी जोड़ दें तो उसमें $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ की आवृत्ति से बार-बार स्फुलिंग विसर्जन (spark discharge) होगा। इसके कारण अधिक तीव्रता की विद्युत चुम्बकीय तरंगें उत्पन्न होंगी। जिनकी आकृति चित्र 13 की भांति होगी।

चित्र 13

2.3. **हर्ट्ज का प्रयोग (Hert'z Experiment)**—रेडियो टेलीग्राफी के लिये यह प्रयोग आधार शिला बनाता है। हर्टज़ का उपकरण चित्र 14 की भांति था। A और B दो ज़िंक की प्लेट हैं जिनका क्षेत्रफल 40 सें० मी० $\times$40 सें० मी० है। P एक प्रेरण कुंडल का प्राथमिक कुंडल है और S उसका द्वैतीयक। G एक वायु अन्तर है।

इस परिपथ से बड़े तीव्र विद्युत चुम्बकीय दोलन उत्पन्न होते हैं। इसीलिये इसे प्रेषक (Transmitter) कहते हैं।

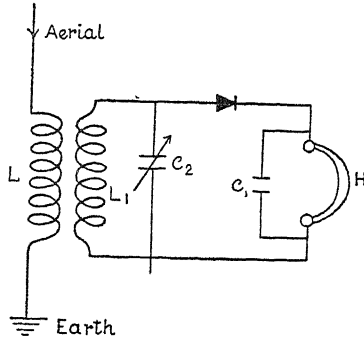
इन विद्युत चुम्बकीय दोलनों के ग्रहण (Receive) करने के लिये एक वृत्ताकार तार *D* प्रयुक्त होता है जिसके सिरों पर दो धातु के गोले लगे रहते हैं। जब कि *D*

चित्र 14

को *G* के सामने इस प्रकार रखा जाता है कि *D* की घुंडियों को मिलाने वाली रेखा वायु अन्तर (*G*) के समान्तर है तो *D* में स्फुलिंग विसर्जन होता है। यह एक विद्युत चुम्बकीय अनुनाद (Resonance) का उदाहरण है।

2.4. **अवमंदित तरंगों का प्रेषण (Transmission of damped waves)**—मार्कोनी ने हर्टज़ के उपकरण में बड़ा भारी सुधार किया। उन्होंने कहा कि यदि नीचे वाली ज़िंक प्लेट को पृथ्वी में गाड़ दें और ऊपरी ज़िंक प्लेट को हटाकर उसके स्थान पर एक लम्बा सा ऊर्ध्व तार लगा दें तो तरंगों को अपेक्षाकृत अधिक दूरी तक भेजा जा सकता है।

चित्र 15

व्यवहार में अधिक ऊर्जा की तरंगें उत्पन्न करने के लिये चित्र 15 की भाँति मार्कोनी के प्रबन्ध का संशोधित रूप प्रयुक्त होता है।

प्रेरण कुंडल का द्वैतीयक (Secondary), प्रेरकत्व (L_1) से सीधा जोड़ने की बजाय चित्र की भांति अन्योन्य प्रेरकत्व (Mutual Inductance) के द्वारा सम्बन्धित किया जाता है। स्फुलिंग अन्तर (Spark Gap) के परिपथ में उत्पन्न हुये विद्युतीय दोलनों के परिणाम स्वरूप L_2 प्रेरकत्व में एक ऊँची आवृत्ति की विद्युत धारा प्रवाहित होने लगती है। L_2 से सम्बन्धित S कुंडल में फलत: ऊँची आवृत्ति का परिवर्तन-शील चुम्बकीय क्षेत्र आरोपित हो जाता है। S के प्रेरकत्व को धीरे-धीरे इस प्रकार बदल कर नियंत्रित किया जाता है कि ऐरियल (Aerial) और पृथ्वी से सम्बंधित तार की धारिता और S प्रेरकत्व का परिपथ स्फुलिंग अन्तर वाले परिपथ से अनुनाद उत्पन्न करने लगे। इस प्रकार एक बहुत ही शक्तिशाली तरंगों की एक श्रेणी (Series) विकरित (radiated) होती है।

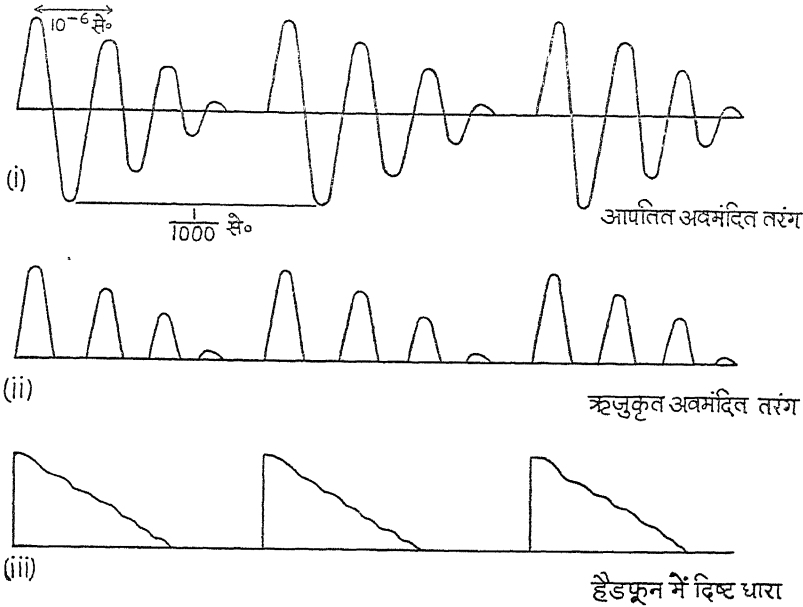
2.5. **ग्राहक प्रबन्ध (Receiving arrangement)**—हर्टज़ के ग्राहक यंत्र (चित्र 14 में D) में यह दोष था कि उसमें L, C को बदल कर ग्राहक परिपथ की स्वतंत्र आवृति (natural frequency) को प्रेषक से आनेवाली तरंगों से अनुनाद उत्पन्न कराने के लिये कोई प्रबन्ध नहीं था। परिपथ में यदि टेलीफोन ग्राहक यंत्र (telephone receiver) लगाना है तो धारा केवल एक ही दिशा में बहनी चाहिये। इसलिये परिपथ में एक ऋजुकारी प्रबन्ध (rectifying arrangement) भी अवश्य शामिल होना चाहिये।

चित्र 16

आधुनिक ग्राहक यंत्र चित्र 16 में दिखाया गया है। इसके आवश्यक भाग निम्न हैं—

(i) ऐरियल (Aerial)
(ii) पृथ्वी (Earth)
(iii) L_1 परिवर्तन शील प्रेरकत्व
(iv) स्थिर धारिता C_1
(v) परिवर्तनशील धारिता C_2
(vi) रवे का ऋजुकारी R
(vii) हैडफून H.

2.6. **रेडियो प्रेषण और ग्राहण (Receiption) की क्रिया विधि**—प्रेषक से विकरित ऊँची आवृत्ति की विद्युत चुम्बकीय तरंगें ग्राहक के ऐरियल पर आकर उसमें उसी ऊँची आवृति से दोलन करने वाला वि० वा० बल और धारा उत्पन्न करती हैं। ग्राहक परिपथ की प्रेरकत्व या धारिता नियंत्रित करके यदि उसकी प्राकृतिक आवृति (natural frequency) ($f=1/2\pi\sqrt{LC}$) भी आपतित आवृति के बराबर कर दी जाय तो भारी धारा प्रवाहित होने लगेगी। इस समय ग्राहक परिपथ 'अनुनाद'

(resonance) के लिये 'ट्यून' किया हुआ (Tuned) कहा जाता है। आपतित तरंग की आवृत्ति लगभग 10^6 प्रति से० (दस लाख) होती है। इस आवृत्ति पर हैडफून कम्पन नहीं कर सकता। अतः ऋजुकारी लगाना आवश्यक है।

रवे के ऋजुकारी की क्रिया—इसमें कार्बोरंडम (Carborundum) या गैलीना (Galena) का रवा प्रयुक्त होता है। धारा की एक दिशा के लिये इन रवों का प्रतिरोध अत्यल्प होता है परन्तु विपरीत धारा के लिये प्रतिरोध का मान अत्यधिक होता है। अतः धारा केवल एक ही दिशा में बह सकती है। चित्र 17 (i) में ऊँची आवृत्ति की आपतित तरंग दिखाई गई है। 17 (ii) में वही तरंग ऋजाकारी में से गुजरने के बाद दिखाई है। हैडफून में परिणामित धारा प्रवाह 17 (iii) में प्रदर्शित

चित्र 17

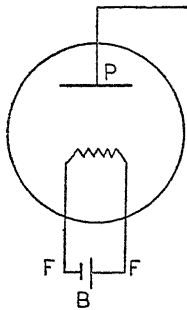
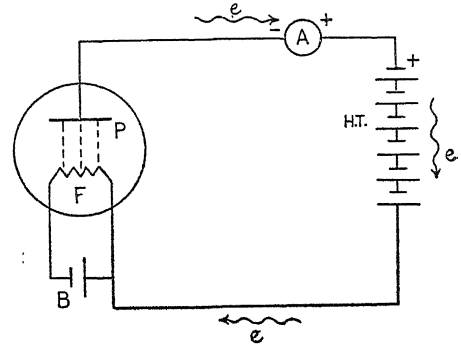
है। अतः स्पष्ट है कि हैडफून प्रति से० उतने ही बार कम्पन करेगा जितनी स्फुलिंग (Sparks) प्रति सेकिंड प्रेषक में उत्पन्न होते हैं। इसकी आवृति लगभग 1000 होती जो श्रव्य अवधि (audible range) की आवृति है। अतः हैडफून में ध्वनि उत्पन्न होगी जो सुनी जा सकती है।

प्रेषक यंत्र में प्रेरण कुंडल के प्राथमिक में एक कुंजी लगाकर परिपथ को थोड़ी या अधिक देर तक बंद किया जा सकता है। इससे छोटी या लम्बी तरंग श्रेणी (wave

train) प्रेषक से विकिरित होगी जिससे ग्राहक यंत्र में मोर्स प्रबन्ध के संगत डौट (dot) या डैश (dash) के समान छोटे या लम्बे संकेत उत्पन्न किये जा सकते हैं।

2.7. **तापायन (Thermions)**—निर्वात् स्थान में यदि एक पतला धातु का तार (तन्तु) गर्म किया जाय तो उससे इलैक्ट्रन निकलने लगते है। इन इलैक्ट्रनों को तापायन (Thermions) कहते हैं। जैसे जैसे तन्तु का ताप बढ़ता जाता है तापयन की संख्या बढ़ जाती है।

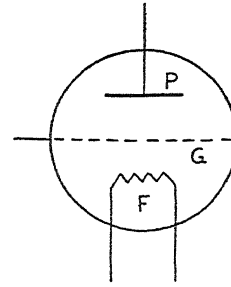
2.8. **डायोड वाल्व (Diode Valve)**—सर्व प्रथम फ्लैमिंग ने इसकी रचना की। निर्वात (Vacuum) बल्ब में एक प्लेटीनम का तन्तु (Filament) होता है जिसके दोनों सिरे F, F बाहर निकले रहते हैं। तन्तु के गिर्द धातु की एक प्लेट (Plate) होती है जिसका सम्बन्ध भी बाहर रहता है (चित्र 18)।

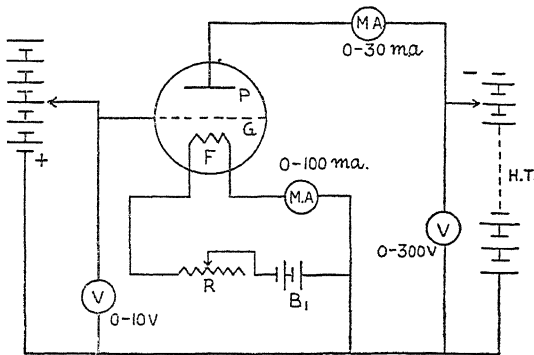
बैटरी B से धारा बहाकर तन्तु के ऊँचे ताप तक गर्म करने से तापायन (Thermions) निकलने लगते हैं जो तन्तु के गिर्द ही एकत्रित होकर ऋणात्मक स्थान आवेश (Negative space charge) बनाते हैं।

चित्र 18 चित्र 19

ऊँचे विभवत्व की बैटरी $H.T.$ के द्वारा, अब यदि प्लेट P को तन्तु की अपेक्षा धनात्मक विभव दे दिया जाय तो तन्तु से निकले हुये इलैक्ट्रन प्लेट की ओर आकर्षित हो जायेंगे। और परिपथ में दिखाये हुये मार्ग ($\downarrow$) के अनुसार एक इलैक्ट्रोनिक धारा (Electronic current) बहने लगेगी (चित्र 19)।

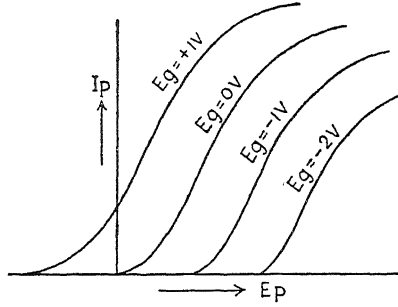
यदि P तन्तु की अपेक्षा ऋणात्मक है तो सब इलैक्ट्रन विकर्षित हो जायेंगे और कोई भी इलैक्ट्रन P तक न पहुँच पायेगा। अतः परिपथ में धारा शून्य होगी। स्पष्ट है कि धारा केवल एक ही दिशा में बह सकती है। इसीलिये इसको "वाल्व" (Valve) कहा गया है। डायोड वाल्व एक अच्छा ऋजुकारी (rectifier) है।

2.9. **ट्रायोड वाल्व (Triode Valve)**—सन 1907 में ली० डी० फौरेस्ट ने डायोड में तन्तु और प्लेट के बीच एक दूसरा इलैक्ट्रोड बढ़ा दिया। यह पतले तारों की एक जाली का बना होता है। इसे ग्रिड (Grid) कहते हैं। (चित्र 20 में *G*)

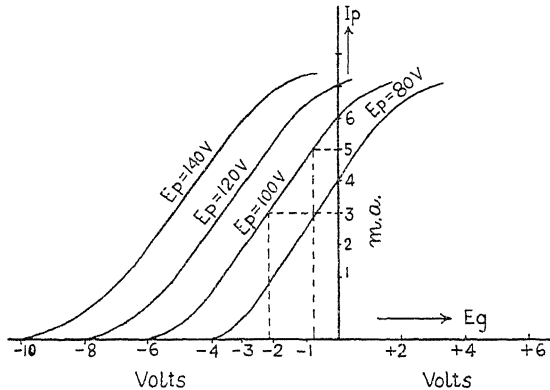
यदि ग्रिड *G* को तन्तु की अपेक्षा धन विभव दे दिया जाय तो उससे तन्तु के गिर्द उत्पन्न हुआ ऋणावेश शून्यीकृत (neutralized) हो जायेगा और दिये हुये प्लेट के विभव पर अब अधिक इलैक्ट्रन आकर्षित हो सकते हैं। अतः *G* के लगाने से प्लेट परिपथ में बहने वाली इलैक्ट्रोनिक धारा का और अच्छा नियंत्रण हो सकता है।

चित्र 20

2.10. **ट्रायोड के लक्षण वक्र (Characteristic curves)**—ट्रायोड के प्लेट परिपथ में धारा का मान ग्रिड (*G*) विभव और प्लेट विभव दोनों के बदलने से परिवर्तित हो जाता है। अतः चित्र 21 की भांति परिपथ जोड़कर (i) ग्रिड विभव (E_g) को स्थिर रखकर प्लेट विभव (E_p) को बदल कर अथवा (ii) प्लेट विभव (E_p) को स्थिर रखकर E_g के विभिन्न मानों के लिये परिणामित प्लेट धारा (I_p) के परिवर्तन का अध्ययन किया जा सकता है। विभिन्न मिलीऐम्पियर मापी और वोल्ट मापियों की अवधि (range) चित्र में अंकित है।

चित्र 21

(i) **एनोड लक्षण** (Anode characteristic) **वक्र**—स्थिर *E* के लिये E_p और I_p के बीच खींचा गया वक्र ऐनोड लक्षण वक्र कहलाता है। ग्रिड विभव (E_g) का मान क्रमशः +1, 0, −1, −2 वोल्ट पर स्थिर रखकर प्लेट विभव (E_p) को बदलते जाइये और संगत प्लेट धारा (*I*) का मान 0−30 मि० ऐम्पियर की

अवधि वाले ऐम्पियर मापी से पढ़ते जाइये। Y अक्ष पर I_p और X– अक्ष पर E_p लेकर चित्र 22 की भांति वाल्व के लिये विभिन्न एनोड लक्षण वक्र प्राप्त हो जायेंगे।

चित्र 22

(ii) **पारस्परिक लक्षण** (Mutual characteristic) **वक्र**—स्थिर E_p के लिये I_p और E_g के बीच खिचे हुये ग्राफ को कहते हैं।

चित्र 21 के परिपथ से ही E_p का मान बारी बारी से 80; 100; 120; 140 वोल्ट रखकर E_g का मान बदलते जाइये और साथ ही I_p का मान भी मि० ऐम्पियर मापी से पढ़ते जाइये। I_p को Y-अक्ष पर और E_g को X-अक्ष पर लेकर चित्र 23 की भांति विभिन्न पारस्परिक लक्षण वक्र खींचे जा सकते हैं।

चित्र 23

2.11. ट्रायोड वाल्व के स्थिरांक (Constants)—किसी भी वाल्व का कार्य निम्न तीन स्थिरांकों से ज्ञात किया जाता है—

(i) प्रवर्द्धन गुणक (Amplification factor)

(ii) प्रत्यावर्त्ती (*A.C.*) प्रतिरोध

(iii) अन्योन्य चालकता (Mutual conductance)

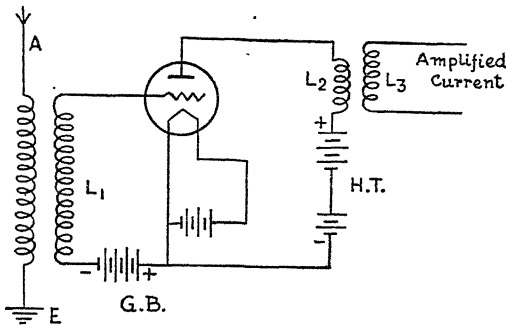
(i) **वाल्व का प्रवर्द्धन गुणक** (Amplification factor)—प्लेट धारा में दिया हुआ परिवर्तन उत्पन्न करने के लिये स्थिर E_g पर प्लेट विभव के आवश्यक परिवर्तन और स्थिर E_p पर ग्रिड विभव में आवश्यक परिवर्तन के अनुपात के बराबर होता है। चित्र 23 में ग्रिड विभव E_g का मान -1 वोल्ट रखकर प्लेट धारा का मान 3 मि० ऐ० से 5 मि० ऐ० तक बढ़ाने के लिये प्लेट विभव E_p को 80 वोल्ट से 100 वोल्ट करना होता है। परन्तु यही परिवर्तन (3 से 5 मि० ऐ०) प्लेट विभव को 100 वोल्ट पर स्थिर रखकर ग्रिड विभव को -3 वोल्ट से -1 वोल्ट कर देने से भी उत्पन्न किया जा सकता है।

$$\text{अत: वाल्व का प्रवर्द्धन गुणक} = \frac{100-80}{(-1)-(-3)} = \frac{20 \text{ वोल्ट}}{2 \text{ वोल्ट}} = 10$$

इस प्रकार स्पष्ट है कि ग्रिड विभव में 1 वोल्ट के परिवर्तन से प्लेट धारा में वही परिवर्तन उत्पन्न किया जा सकता है जो प्लेट विभव में 20 वोल्ट परिवर्तन करने से होता है।

(ii) **वाल्व का प्रत्यावर्ती प्रतिरोध**—स्थिर ग्रिड विभव पर प्लेट विभव के परिवर्तन और उससे परिणामित प्लेट धारा के परिवर्तन के अनुपात के बराबर होता है।

(iii) अन्योन्य चालकता की परिभाषा प्लेट धारा के परिवर्तन और ग्रिड विभव के परिवर्तन के अनुपात से की जाती है जब कि प्लेट विभव स्थिर रहता है।

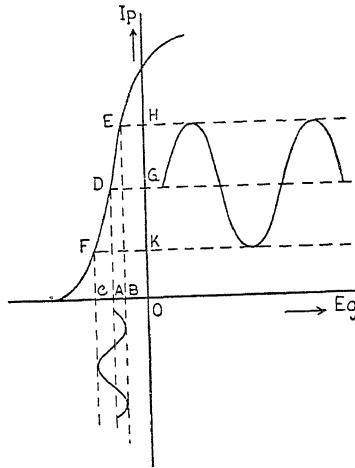
2.12. ट्रायोड वाल्व प्रवर्द्धक की तरह (Triode as an Amplifier)—

चित्र 24

आपतित प्रत्यावर्ती दोलनों का प्रवर्द्धन करने के लिये चित्र 24 की भांति ट्रायोड का विद्युत परिपथ बनाया जाता है। ग्रिड को एक विशेष उपयुक्त विभव देकर आपतित

प्रत्यावर्ती विभवान्तर को ग्रिड परिपथ में आरोपित किया जाता है। इसके संगत प्लेट परिपथ में अत्यधिक प्रवर्द्धित प्रत्यावर्ती धारा और विभवान्तर प्राप्त होते हैं।

प्रक्रिया—प्रवर्द्धन की क्रिया को समझने के लिये चित्र 25 में अन्योन्य लक्षण वक्र के ऋजु (Strait) भाग पर ध्यान दीजिये।

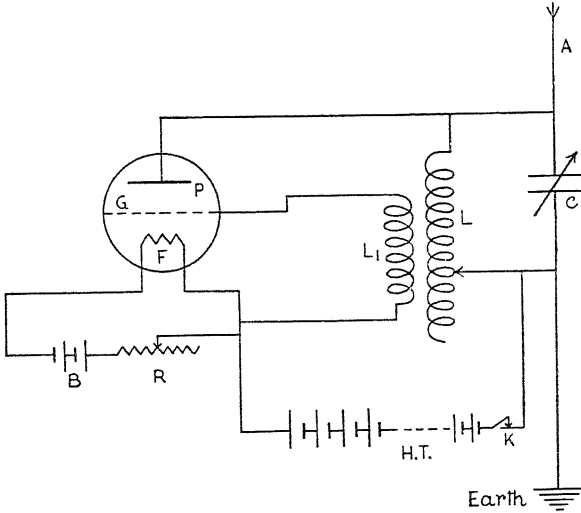
मान लीजिये ग्रिड को एक स्थिर ऋण विभव OA के बराबर दे रखा है। प्लेट परिपथ में एक स्थिर मान OG की धारा बहने लगेगी।

अब इस समय ग्रिड परिपथ में एक प्रत्यावर्ती विभवान्तर अथवा रेडियो संकेत आरोपित करने से ग्रिड का विभव उसी आवृत्ति से बढ़ता घटता रहेगा। संकेत के धन आयाम (positive amplitude) के समय ग्रिड का ऋण विभव OA से OB हो जायेगा और ऋण आयाम (negative amplitude) के समय ग्रिड का ऋण विभव OC हो जायेगा। उन क्षणों पर प्लेट धारा का मान क्रमशः OH और OK के बराबर होगा (चित्र 25)। इस प्रकार संकेत की एक आवृत्ति में ग्रिड का विभव तो केवल OB और OC के बीच ही बदलता है परन्तु उसके संगत प्लेट धारा का मान OH और OK के बीच बदलेगा। प्लेट धारा के परिवर्तन की आवृत्ति आरोपित संकेत की आवृत्ति के ही बराबर होगी।

चित्र 25

प्लेट परिपथ की परिवर्तन शील धारा से उसी परिपथ में अत्यधिक प्रवर्द्धित प्रत्यावर्ती विभवान्तर की उत्पत्ति होगी। मान लीजिये वाल्व का प्रवर्द्धन गुणक 10 है तो इसका अर्थ यह है कि ग्रिड विभव में 1 वोल्ट का परिवर्तन होने से परिणामित प्लेट धारा के परिवर्तन से प्लेट परिपथ में 10 वोल्ट का परिवर्तन होगा। इस प्रकार आरोपित प्रत्यावर्ती विभवान्तर का आयाम 10 गुना बढ़ जायेगा।

2.13. **वि० चु० दोलन उत्पादक की तरह (Triode as an Oscillator)**—वास्तव में ट्रायोड वाल्व वि० चु० दोलनों का उत्पादन नहीं करता। परन्तु वाल्व की सहायता से LC परिपथ में एक बैटरी से लगातार ऊर्जा को देते रहने से अविरत (continuous or undamped) तरंगें उत्पन्न की जाती हैं।

वाल्व का वास्तविक विद्युत परिपथ चित्र 26 में प्रदर्शित है।

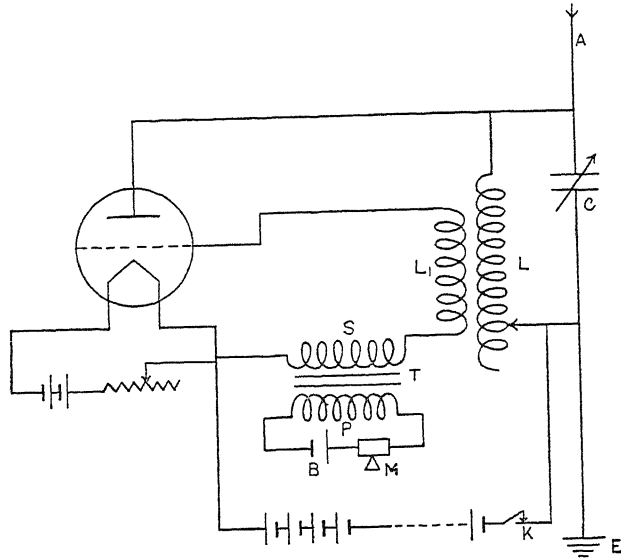
एरियल के परिपथ में परिवर्तनशील धारिता C और परिवर्तनशील प्रेरकत्व L समानान्तर में लगी है। अन्योन्य प्रेरकत्व के द्वारा ग्रिड परिपथ की L_1 प्रेरकत्व L से सम्बंधित की गई है।

चित्र 26

प्लेट परिपथ की कुंजी K को दबाते ही तन्तु से प्लेट P की ओर इलैक्ट्रन आकर्षित होंगे और प्लेट परिपथ में धारा बहेगी। तुरन्त ही एरियल के LC परिपथ में $1/2\pi\sqrt{LC}$ आवृति के वि० चुम्बकीय दोलन प्रारम्भ हो जायँगे। LC परिपथ की परिवर्तनशील धारा के कारण ग्रिड से जुड़ी प्रेरकत्व L_1 में भी विभवान्तर का संगत उतार चढ़ाव प्रेरित हो जायेगा। ग्रिड विभव के उतार चढ़ाव से प्लेट धारा में उतार चढ़ाव होगा जिससे पुनः एरियल के वि० चु० दोलनों को सहायता मिलगी। ऐरियल के दोलन फिर ग्रिड विभव में उतार चढ़ाव उत्पन्न करेंगे और अन्त में फिर स्वयं सहायता प्राप्त करेंगे। इस प्रकार जब तक प्लेट परिपथ की कुंजी K बन्द है एरियल के LC परिपथ में होने वाले वि० चु० दोलनों की ऊर्जा इकसार रहेगी और इसके परिणामस्वरूप एरियल से अविरत (undamped) तरंगें विकरित होती रहेंगी।

L_2 कुंडल को प्रतिक्रिया (Reaction or feed back) कुंडल कहते हैं।

2.14. **भाषण का प्रेषण (Transmission of Speech)**—गत धारा में हमने देखा कि ट्रायोड वाल्व की सहायता से अत्यधिक ऊँची आवृत्ति की अविरत

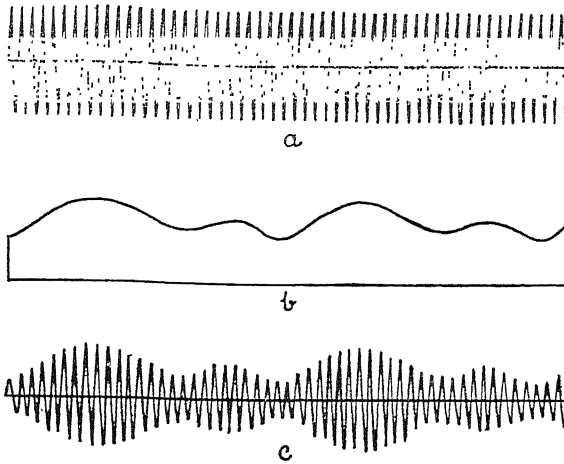
(undamped) तरंग उत्पन्न की जा सकती हैं। इनको वाहक (Carrier) तरंग कहते हैं।

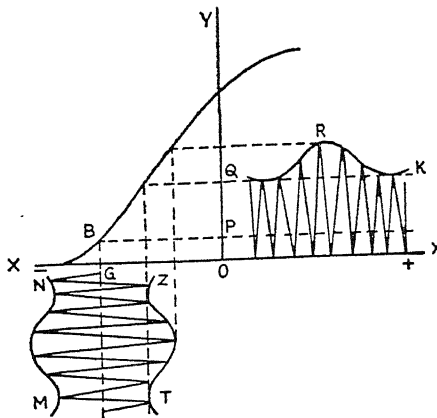
चित्र 26 के ग्रिड परीपथ में एक माइक्रोफोन जोड़ देने से चित्र 27 बनता है। यहां एक ट्रांसफौर्मर T का द्वैतीयक वाल्व के ग्रिड परिपथ में जुड़ा है और प्राथमिक P के श्रेणी क्रम में एक बैटरी B और एक माइक्रोफोन M लगे हैं।

चित्र 27

जब कोई व्यक्ति माइक्रोफोन के सामने बोलता है तो ट्रांसफौर्मर के प्राथमिक P में परिवर्तनशील धारा के प्रवाह से द्वैतीयक में भी परिवर्तनशील वि० वा० बल प्रेरित होता है। ग्रिड परिपथ के इस विभव के उतार चढ़ाव के कारण प्लेट धारा भी उसी प्रकार प्रभावित होती है। इससे वाहक तरंगों का आयाम भी उसी श्रव्य आवृति (audible frequency) से परिवर्तित होता है जिस आवृति के उतार चढ़ाव माइक्रो-फोन के परिपथ में हो रहे हैं।

यह बात चित्र 28 से बिल्कुल स्पष्ट हो जाती है जिसमें (a) में वाहक (Carrier) तरंग (b) में माइक्रोफोन परिपथ की धारा और (c) में परिणामित वाहक तरंग प्रदर्शित है।

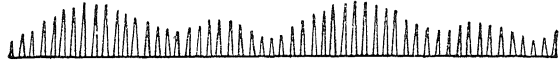
2.15. **ट्रायोड वाल्व का परिचायक कार्य (Triode as a detector or rectifier)**—इसका सिद्धान्त समझने के लिये चित्र 29 पर ध्यान दीजिये।

अन्योन्य लक्षण वक्र के निचले मोड़ B के संगत ग्रिड का विभव कर दीजिये और गत धारा के चित्र 28 b में प्रदर्शित परिणामित वाहक तरंग से उत्पन्न होने वाले परिवर्तनशील विभवान्तर को ग्रिड परिपथ में आरोपित कीजिये।

चित्र 28

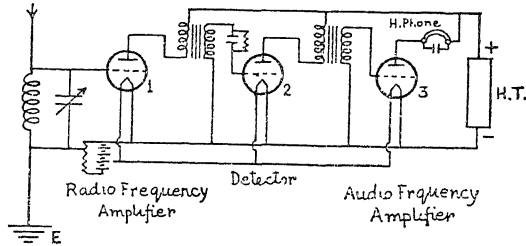
आरोपित दोलन की अनुपस्थिति में प्लेट परिपथ में स्थिर मान OP के बराबर धारा बहती रहेगी। संकेत के आरोपित होने से ग्रिड का विभव वाहक तरंग की

चित्र 29

आवृत्ति से घटता बढ़ता रहेगा उसके कारण प्लेट परिपथ में भी उसी आवृत्ति से धारा

का मान परिवर्तित होगा। संकेत के धनात्मक भाग (ZT) के संगत प्लेट धारा का मान QRK के बीच रहेगा और ऋणात्मक भाग के कारण ग्रिड का विभव इतना अधिक ऋणात्मक हो जाता है कि प्लेट धारा शून्य रहती है। अतः ऋणात्मक भाग का कोई प्रभाव नहीं होता।

प्लेट धारा का परिणामित मान भी QRKके संगत घटता बढ़ता है। इस प्रकार प्लेट धारा में प्रेषक के माइक्रोफोन की धारा का चढ़ाव उतार केवल एक ओर ही प्रकट होता है। प्लेट परिपथ में लगे हैडफोन में उसी आवृत्ति के कम्पन होंगे जिससे उसी ध्वनि का उत्पादन होगा जो प्रेषक के माइक्रोफान के सामने की गई थी।

चित्र 30

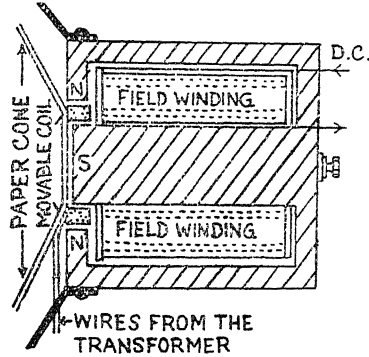
इस प्रकार ट्रायोड वाल्व एक ऋजुकारी का भी काम करता है। माइक्रोफोन के भाषण से प्रभावित वाहक तरंग ट्राइड वाल्व से ऋजुक्त होने के पश्चात् चित्र 30 में दिखाई गई है।

2.16. **ग्राहक यंत्र (Receiving Set)**—व्यवहार में रेडियो संकेतों के ग्रहण करने के लिये चित्र 31 की भांति प्राय 3 वाल्व प्रयुक्त होते हैं।

चित्र 31

आपतित उच्च आवृति के वि० चु० दोलनों में ऊर्जा बहुत कम रहती है। अतः पहले इनको वाल्व 1 की सहायता से प्रवर्द्धित (Amplified) किया जाता है। इसको उच्च आवृत्ति प्रवर्द्धन [High Frequency (*H.F.*) or Radio Frequency (*R.F.*) Amplification] कहते हैं। यह प्रवर्द्धित संकेत पुनः वाल्व 2 के ग्रिड परिपथ में आरोपित किया जाता है। वाल्व 2 धारा 2.15 की भांति परिचायक (detector) का कार्य करता है। इसके प्लेट परिपथ से हमें दिष्ट धारा प्राप्त होती है। वाल्व 3 के ग्रिड परिपथ में आरोपित करके इसे पुनः प्रबर्द्धित करते हैं। परन्तु

यहां पर निम्न आवृत्ति प्रवर्द्धन [Low Frequency (*L.F.*) Amplication] होता है। इससे काफी ऊँची धारा परिपथ में लगे हैडफून में बहती है जिससे वही ध्वनि सुनाई देती है जो प्रेषक के माइक्रोफोन के सामने की गई थी। इस धारा को एक "लाउड स्पीकर" (loud speaker) में भेज कर और भी बढ़ी हुई ध्वनि सुन सकते हैं।

ग्राहक यंत्र का टयूनिंग (Tuning)—एक रेडियो सैट में विभिन्न प्रेषक स्टेशनों से प्रेषित प्रोग्राम ग्रहण किये जा सकते हैं। धारिता या प्रेरकत्व को बदल कर इस प्रकार नियंत्रित करते हैं कि परिपथ की प्राकृतिक आवृत्ति (natural frequency) उसी आवृत्ति के बराबर हो जाय जो ग्रहण करनी है। इसी को रेडियो का टयूनिंग (Tuning) कहते हैं।

2.17. **लाउड स्पीकर (Loud speaker)**—इसके आवश्यक अंग चित्र 32 में प्रदर्शित हैं। (i) कागज के शंकु (cone) के शीर्ष पर लगा कुंडल m एक शक्तिशाली स्थायी चुम्बक के सम्मुख स्थित है।

चित्र 32

(ii) चुम्बक की प्रबलता बढ़ाने के लिये एक दिष्ट धारा सर्पिल कुंडल में बहाई जाती है।

प्रवर्द्धक (Amplifier) या रेडियो ग्राहक यंत्र से आनेवाली परिवर्तनशील धारा कुंडल m में बहाई जाती है जिससे स्थायी चुम्बक के क्षेत्र और इस कुंडल m के क्षेत्र में प्रतिक्रिया होती है। इसके परिणाम स्वरूप कुंडल m और उससे सम्बन्धित कागज शंकु कम्पन करने लगते हैं जिससे ध्वनि उत्पन्न होती है। m और शंकु का भार बहुत कम होता है अतः ऊँची आवृत्ति के कम्पन भी कर लेते हैं। प्रत्येक आवृत्ति की ध्वनि का समान प्रवर्द्धन होने के कारण लाउड स्पीकर से निकलने वाली ध्वनि ठीक वैसी ही होती है जैसी माइक्रोफोन के सामने की गई थी। केवल उसकी तीव्रता अधिक होती है।

सारांश

यदि किसी विद्युतीय परिपथ में प्रेरकत्व (inductance) और धारित्र का आयोजन किया जाय और प्रतिरोध कम हो तो परिपथ में बार-बार धारा प्रवाह शीघ्रता से स्थापित करने और तोड़ने से दोलन उत्पन्न होते हैं, जिसके कारण माध्यम में विद्युत चुंबकीय तरंगें फैलती हैं। यदि परिपथ में एक कुंजी लगाकर एक ऐरियल (Aerial) का भी आयोजन हो, तो ये तरंगें काफी दूर तक तीव्र रहती हैं, और इनके द्वारा मोर्स संकेतों को भेजा जा सकता है। इनको प्राप्त करने के लिए एक अनुनादित परिपथ को व्यवस्थित करते हैं, जिसमें एक परिचायक और हैडफून रहता है।

संगीत या बोलचाल को प्रेषित करने के लिए तापायनिक वाल्वों का उपयोग करते हैं। डायोड वाल्व, परिचायक का कार्य करता है, पर ट्रायोड को, परिचायक, संवर्धक एवं निरंतर दोलनों के सृष्टा के रूप में प्रयोग किया जा सकता है। बोलचाल के कारण उच्च आवृत्ति की धारा में स्पंदन होता है। ग्राहक द्वारा उच्च-आवृत्ति की धारा (जो ऊर्जा की वाहक विद्युत्-चुंबकीय तरंगों को उत्पन्न करती हैं) में से उच्च आवृत्ति की स्थिर धारा निकाल दी जाती है, और मौलिक स्पंदनों के बचे रहने पर उन्हें ध्वनि के तदनुरूपी स्पंदनों में परिणत कर लिया जाता है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. बिना तार की टेलीग्राफी पर नोट लिखिये।
2. ट्रायोड वाल्व की रचना समझाइये। इसको प्रवर्द्धक और परिचायक की तरह प्रयोग करने के ढंग को स्पष्ट कीजिये।
3. रेडियो टेलीफोनी पर टिप्पणी लिखिये।
4. डायोड वाल्व की क्रिया प्रणाली पर प्रकाश डालिए। डायोड और ट्रायोड में से कौन अच्छा परिचायक (detector) है।
5. विद्युत् प्रदोलनों (electrical oscillations) की उत्पत्ति के लिए कौन बातें आवश्यक हैं। विद्युतीय अनुनाद की यांत्रिक (Mechanical) अनुनाद से तुलना कीजिए।
6. किसी सामान्य बेतार के ग्राहक (Wireless) यंत्र का वर्णन कीजिए।
7. ट्रायोड वाल्व के विभिन्न उपयोगों का विवरण दीजिए।

अध्याय 3

रेडियो धर्मिता और परमाणु का नाभिक

(Radio Activity and Nucleus of the Atom)

3.1. सन् 1896 ई० में बेकरेल (Becquerel) ने देखा कि मोटे काले कागज़ में अच्छी प्रकार लिपटी हुई फोटोग्राफिक प्लेट पर यूरेनियम और पोटैशियम के दुहरे सल्फट का रवा रखने से प्लेट पर रवे की आकृति का चिह्न बन जाता है। इसका कारण रवे से निकलनेवाली अज्ञात किरणें हैं जिनको रेडियो-धर्मी किरणें (Radio-active Rays) या बेकरेल किरणें (Becquerel Rays) कहते हैं। इस घटना को रेडियो धर्मिता (Radio Activity) और उस पदार्थ को जो स्वत: रेडियो धर्मी किरणें निकालता रहता है रेडियो धर्मी पदार्थ (Radio Active Substance) कहते हैं।

नाभिक से बाहरी इलैक्ट्रनों का इन किरणों से कोई सरोकार नहीं है। रेडियो धर्मी परमाणु का नाभिक (nucleus) किसी अज्ञात कारणवश स्वत: विखण्डित होता रहता है जिससे वह मूल परमाणु किसी दूसरे परमाणु में बदल जाता है और साथ ही बड़ी ऊँची ऊर्जा के साथ रेडियो धर्मी किरणें उससे बाहर निकलती हैं।

बाद के प्रयोगों द्वारा ज्ञात हुआ कि यूरेनियम ही नहीं वरन् थोरियम (Thorium), पोलोनियम (Polonium), रेडियम (Radium), ऐक्टीनियम (Actinium), आदि अन्य परमाणु भी रेडियो धर्मी हैं।

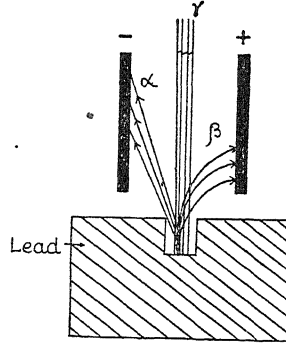
3.2. रथरफोर्ड (Rutherford) ने प्रयोगों द्वारा देखा कि रेडियो-धर्मी किरणें प्राय: तीन प्रकार की होती हैं—

(i) **अल्फा किरणें** (α-rays)—जो अलूमीनियम की 0·1 मि० मी० मोटी पत्ती से शोषित हो जाती हैं।

(ii) **बीटा किरणें** (β-rays)—जो 0·5 सें० मी० मोटी अलूमीनियम की पत्ती से पूर्णतया शोषित हो जाती है।

(iii) **गामा किरणें** (γ-rays)—जो अलूमीनियम की चद्दर से बड़ी कठिनाई से भी पूर्णतया शोषित न हो सकें।

3.3. **प्रयोग**—सीसे के मोटे टुकड़े में काफ़ी गहराई पर रखे हुए यूरेनियम के यौगिक से निकलनेवाली रेडियो-धर्मी किरणों को एक स्थिर विद्युतीय क्षेत्र से गुज़ारा गया। परीक्षण करने से ज्ञात हुआ कि किरणें तीन भागों में बँट जाती हैं। अल्फा (α) किरणें तो ऋण प्लेट की ओर मुड़ जाती हैं और बीटा (β) किरणें धन प्लेट की

की ओर। परन्तु गामा (γ) किरणें क्षेत्र से तनिक भी प्रभावित नहीं होतीं और सीधी अविचलित दिशा में निकल जाती हैं।

चित्र 33

अतः स्पष्ट है कि अलफा किरणें धनावेशित कणों से मिल कर बनी हैं और बीटा किरणों में ऋणावेशित कण होते हैं। गामा किरणों में कोई भी आवेशित कण नहीं होता। वे तो प्रकाश और X-किरणों की भाँति विद्युत् चुम्बकीय विकिरण तरंगे हैं।

यही निष्कर्ष किरणों को एक चुम्बकीय क्षेत्र से गुज़ारने के बाद निकलता है।

3.4. अल्फ़ा किरणों के गुण—

(i) रेडियो धर्मी पदार्थ से $1 \cdot 4 \times 10^9$—$1 \cdot 7 \times 10^9$ सें० मी० प्रति से० के ऊँचे वेग से निकलती हैं।

(ii) जिस गैस से हो कर गुज़रती हैं उसमें बड़ा तीव्र आयनीकरण (ionization) उत्पन्न करती हैं।

(iii) फोटोग्राफिक प्लेट को प्रभावित करती हैं।

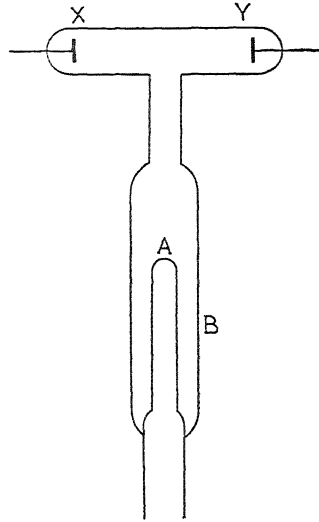
(iv) बेरियम प्लेटीनो साइनाइट और जिंक सल्फेट जैसे पदार्थों में प्रतिदीप्ति (fluorescence) उत्पन्न करती हैं।

(v) इनके प्रभाव से शरीर में असाध्य घाव (incurable burns) उत्पन्न हो जाते हैं।

(vi) उष्मीय प्रभाव उत्पन्न करते हैं। रेडियम सदैव अपना ताप वायुमण्डल से ऊपर स्थिर रखता है।

(vii) कुछ दूरी तक पदार्थ के अन्दर भी घुस जाती हैं। इस दूरी को उनकी अवधि (Range) कहते हैं।

3.5. **अल्फ़ा किरणों की प्रकृति (Nature)—**चुम्बकीय और विद्युतीय क्षेत्रों में इनका विचलन नाप कर आवेश (e) और संहति (m) की निष्पत्ति e/m

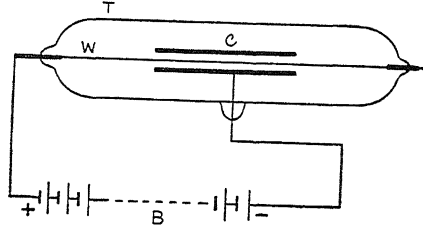
तथा आवेश (e) की गणना की गई। आवेश का मान लगभग 9.56×10^{-10} $e.s.u.$ अर्थात् इलैक्ट्रोनिक आवेश का दूना आया। e/m का मान लगभग 1.446×10^{14} आया। इससे अल्फा कण की संहति 6.60×10^{-24} ग्राम अर्थात् हीलियम परमाणु

चित्र 34

की संहति के बराबर आती है। दूसरे यह भी देखा गया कि समस्त रेडियो धर्मी पदार्थों से निकलनेवाले अल्फा कण पूर्ण रूपेण समान होते हैं। अतः हम आसानी से कह सकते हैं कि एक अल्फा (α) कण हीलियम (Helium) का परमाणु है जिसमें से 2 इलैक्ट्रन निकल गये हैं। अर्थात् हीलियम परमाणु का नग्न नाभिक (Stripped nuclius) ही अल्फा (α) कण है।

रथरफोर्ड ने इसका निस्सन्देह प्रमाण चित्र 34 में व्यक्त उपकरण की सहायता से दिया। यह सब (A,B) काँच की नलिका हैं। A और B के बीच निर्वात् है। A में अल्फास्रोत रख कर X और Y के बीच विद्युत् विसर्जन गुज़ारने से हीलियम का वर्णपट प्राप्त हुआ। A की पतली दीवार को पार करके आल्फा कण B में जाता है और वहाँ कुछ इलैक्ट्रन पकड़ कर उदासीन हीलियम गैस के परमाणु में बदल जाता है। X और Y इलैक्ट्रोड के बीच जा कर हीलियम का वर्णपट उत्पन्न करता है।

3.6. **गाइगर मुलर काउन्टर (Geiger Muller Counter)—**

रचना—काँच की पतली दीवार की नलिका T में पारा स्तम्भ के $5.0 - 10.0$ सें० मी० के दबाव पर आर्गन (Argon) गैस भरी है। नलिका की अक्ष पर टंग्सटन या निकिल का W तार है जिसको एक छोटा-सा ताँबे या निकिल का बेलन C घेरे है।

बैटरी B की सहायता से W और C के बीच एक ऊँचा विभव (1000 वोल्ट) लगा देते ह। तार धन विभव पर रहता है।

चित्र 35

क्रिया—जैसे ही कोई आयनीकारक कण जैसे आल्फा (α) कण नलिका में घुसता है कुछ आर्गन गैस के परमाणु आयनीकृत (ionised) हो जाते हैं। उत्पन्न हुए इलैक्ट्रन बड़े प्रबल बल से तार W की ओर आकर्षित होते हैं। थोड़ी दूर चल कर ही बड़ा ऊँचा वेग प्राप्त कर लेते हैं और टक्कर द्वारा अतिरिक्त आयन उत्पन्न करते हैं। यह सब कुछ बहुत ही थोड़े समय में हो जाता है। अतः परिपथ में एक क्षणिक प्रबल धारा बहती है जिसे प्रवाहित करके एक विद्युत् चुम्बकीय काउण्टर उत्प्रेरित किया जा सकता है। इस प्रकार नलिका में घुसने वाले आल्फा कणों की संख्या गिनी जा सकती है।

3.7. **बीटा (β) किरणों के गुण**—

(i) इनका वेग बहुत ही ऊँचा होता है। प्रकाश वेग के 1% से 99% तक के वेग से चलनेवाले बीटा कण पाये गये हैं। एक ही पदार्थ से निकले हुए सब कणों का का वेग समान नहीं होता।

(ii) फोटोग्राफिक प्लेट को प्रभावित करते हैं। इनका प्रभाव आल्फा किरणों से अधिक होता है।

(iii) बेरियम प्लेटीनो साइनाइड में प्रतिदीप्ति उत्पन्न करते हैं।

(iv) पदार्थ में गहराई तक घुस जाते हैं। लगभग ·5 सें० मी० मोटी अलूमीनियम की चद्दर को पार कर जाते हैं।

(v) वायु में आयन उत्पन्न करती है। परन्तु उत्पन्न हुए आयनों की संख्या आल्फा किरणों द्वारा उत्पन्न किये आयनों के लगभग 1/100 होती हैं।

(vi) विद्युतीय और चुम्बकीय क्षेत्रों से विचलित हो जाते हैं।

3.8. **बीटा कणों की प्रकृति (Nature)**—विद्युतीय और चुम्बकीय क्षेत्रों में इनके विक्षेप नाप कर e/m, e और वेग v की गणना करने से ज्ञात होता है कि इन कणों का आवेश और संहति इलैक्ट्रन के आवेश और संहति के बराबर हैं। अतः नाभिक से निकला हुआ ऊँचे वेग से गतिमान इलैक्ट्रन ही बीटा कण बन जाता है।

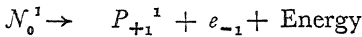
प्रयोगों से ज्ञात हुआ है कि β-कण की संहति स्थिर नहीं रहती। वरन्, आइन्स्टाइन के सापेक्षिक सिद्धान्त (Einstein's Theory of Relativity) के अनुसार उसके वेग के साथ बदलना है। यदि m, m_0 क्रमशः v और शून्य वेग पर β-कण की संहति है, तो आइन्स्टाइन ने बताया कि

$$m = \frac{m_0}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$ होगा।

यहाँ $c = 3 \times 10^{10}$ सें०मी०/प्रति से० प्रकाश का निर्वात् में वेग है।

3.8a. प्रयोगों द्वारा यह सिद्ध हो चुका है कि इलैक्ट्रन का आकार नाभिक (nucleus) के आकार से कहीं बड़ा होता है। अतः इलैक्ट्रन परमाणु के नाभिक में उपस्थित नहीं हो सकता। प्रश्न उठता है तो फिर β-कण कहाँ से उत्पन्न होता है?

वास्तव में नाभिक में केवल प्रोटन (आवेश+1, संहति 1) तथा न्यूट्रन (आवेश 0 संहति 1) ही होते हैं। जब न्यूट्रन एक प्रोटन में बदलता है, तो इलैक्ट्रन उत्पन्न होता है और कुछ संहति, ऊर्जा में परिणत हो जाती है जिससे गामा किरणें और β-कणों की गतिजा ऊर्जा उत्पन्न होती हैं।

$$N_0^1 \rightarrow \quad P_{+1}^1 + e_{-1} + \text{Energy}$$

न्यूट्रन प्रोटन इलैक्ट्रन

यही कारण है कि β-किरणें और γ-किरणें सदा साथ मिलती हैं।

3.9. गामा किरणों के गुण—

(i) इनका वेग प्रकाश वेग (3×10^{10} सें० मी०/से०) के बराबर होता है।

(ii) जिस गैस में से गुज़रती है आयन उत्पन्न करती है। परन्तु आयनों की संख्या बहुत ही कम होती है।

(iii) फोटोग्राफिक प्लेट को β-किरणों की भी अपेक्षा अधिक प्रभावित करती हैं।

(iv) प्रतिदीप्ति (Fluorescence) और स्फुर दीप्ति (Phosphorescence) उत्पन्न करती हैं।

(v) चुम्बकीय और विद्युतीय क्षेत्रों से विचलित नहीं होतीं।

(vi) लगभग 30 सें० मी० मोटी लोहे की चादर को भी पार कर जाती हैं।

3.10. प्रकृति (Nature)—

क्योंकि प्रबल से प्रबल चुम्बकीय और विद्युत् क्षेत्रों का इनके मार्ग पर कोई प्रभाव नहीं होता अतः γ-किरणें आवेशित कण नहीं हो सकतीं। वास्तव में ये विद्युत् चुम्बकीय विकिरण तरंगे हैं जिनका तरंग दैर्घ्य X-किरणों से भी छोटा होता है; लगभग $1{\cdot}3 - {\cdot}07$ $A.U.$।

3.11. **रेडियो धर्मी परमाणु का विघटन (Disintegration of Radio-active Atoms)**—रथरफोर्ड और सौदी (Soddy) ने रेडियो धर्मी परमाणुओं के विघटन (disintegration) के विषय में दो नियम दिये—

(i) प्रत्येक रेडियो धर्मी पदार्थ के परमाणु अविराम गति से लगातार नवीन रेडियो धर्मी परमाणुओं में परिवर्तित होते रहते हैं और साथ में α, β और γ किरणें भी निकालते हैं।

(ii) उनके विघटन की दर ताप, दबाव, रासायनिक संगठन आदि बाह्य कारणों से प्रभावित नहीं होती।

जितने समय में रेडियो धर्मी पदार्थ के आधे परमाणु विघटित हो जाते हैं वह उस पदार्थ का "अर्द्धजीवन काल" (Half-life Period) कहलाता है।

रथरफोर्ड और सैदी ने रेडियो-धर्मी विघटन के विषय में एक सिद्धान्त का प्रतिपादन किया। उनके अनुसार किसी भी क्षण विघटित होनेवाले परमाणुओं की संख्या कुल विद्यमान परमाणुओं की संख्या के समानुपाती होती है। यदि किसी समय कुल 100 परमाणु हों, और उनका 1/4 भाग विघटित हो रहा हो, तो पहले 25 परमाणु विघटित होंगे। शेष ·75 परमाणुओं का चौथाई भाग विघटित होने से $75 \times 3/4 = 56{\cdot}25$ परमाणु बचेंगे। फिर 56·25 के चौथाई परमाणु विघटित होकर 56·25 के तीन चौथाई परमाणु अविघटित रहेंगे। यह क्रम बराबर जारी रहेगा।

3.12. **रेडियो-धर्मी श्रेणी (Radio-active Series)**—(i) α-कण का आवेश +2 इकाई और संहति 4 इकाई है। अतः जब भी कोई परमाणु एक α-कण निकालेगा तो उसकी संहति संख्या (mass number) 4 कम हो जायेगा और परमाणु संख्या (atomic number) 2 कम हो जायेगा। अतः स्पष्ट है कि α–विघटन के बाद नवजात परमाणु मूल परमाणु से आवर्त्त-सारिणी (Periodic Table) में दो स्थान नीचे खिसक आयेगा।

(ii) β–कण का आवेश $-{\cdot}1$ और संहति नगण्य है। अतः β–विघटन (decay) के पश्चात् परमाणु की संहति संख्या तो वही रहेगी, परन्तु परमाणु संख्या 1 बढ़ जायेगी। क्योंकि नाभिक से एक ऋणावेश के निकल जाने से 1 धन आवेश की वृद्धि हो जायेगी अतः नवजात परमाणु आवर्त्त सारिणी में 1 स्थान ऊपर चला जायेगा।

यूरेनियम (U), थोरियम (Th) और ऐक्टीनियम (Ac) से प्रारम्भ हो कर तीन अलग-अलग रेडियो धर्मी शृंखलायें सीसे (lead) पर आकर समाप्त होती हैं। इन तीनों शृंखलाओं से सीसे के तीन परमाणु उत्पन्न होते हैं जिनकी परमाणु संख्या 82 होती है और समान रासायनिक गुण प्रदर्शित करते हैं। परन्तु इनकी संहति संख्या क्रमशः 206, 208 और 207 हैं। समान परमाणु संख्या परन्तु विभिन्न संहति संख्या

वाले एक ही परमाणु के रूपों को "समस्थानिक" (Isotope) कहते हैं। इस प्रकार सीसा के तीन समस्थानिक हैं (206, 208, 207)।

3.13. **न्यूट्रन (Neutron)**—सन् 1932 में चाडविक (Chadwick) ने वैरिलियम (Be_9) की चद्दर पर तीव्र-गामी α-कणों की बौछार डाली तो देखा कि उससे निकलनेवाली किरणें पदार्थ में बहुत गहराई तक घुस जाती हैं। 1·5 सें० मी० मोटी सीसा (lead) की चादर पार करने से उनकी तीव्रता केवल 50% घट पाती है। चुम्बकीय क्षेत्र या विद्युतीय क्षेत्र का इनके मार्ग पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता। अतः इनका आवेश तो शून्य है। परन्तु अन्य परमाणुओं जैसे N, H, Be आदि के साथ सीधी टक्कर के बाद उनके आवेग (momentum) नाप कर गणना करने से ज्ञात होता है कि उनकी संहति 1·0070 है जब कि प्रोटन की संहति 1·0076 है। अर्थात् न्यूट्रन का आवेश शून्य और संहति लगभग 1 है।

न्यूट्रन की खोज के बाद परमाणु के नाभिक की रचना के विषय में वैज्ञानिकों की धारणा बिल्कुल बदल गई। इसके पूर्व यह विचार था कि नाभिक में प्रोटन और इलैक्ट्रन होते हैं। परन्तु बाद में देखा गया कि इलैक्ट्रन का आकार नाभिक से बड़ा है। अतः यह नाभिक में नहीं रह सकता।

आधुनिक विचारों के अनुसार नाभिक प्रोटन और न्यूट्रन से मिल कर बनी है। यदि किसी परमाणु की संहति संख्या A और परमाणु संख्या Z है, तो उसके नाभिक में प्रोटन की संख्या Z होगी और न्यूट्रन की संख्या $(A-Z)$। नाभिक से बाहर परिक्रमा करनेवाले इलैक्ट्रनों की संख्या भी Z होगी।

बोरोन और α-कण की टक्कर से निम्न नाभिक क्रिया के अनुसार न्यूट्रन उत्पन्न होता है—

$$B_5^{11} + He_2^4 \longrightarrow N_7^{14} + n_0^1$$

(Boron) (α-कण) (Nitrogen) (Neutron)

क्योंकि न्यूट्रन पर कोई आवेश नहीं होता अतः यह किसी भी परमाणु के नाभिक के निकट बड़ी आसानी से पहुँच जाता है। α-कण क्योंकि धनावेशित है अतः नाभिक के समीप विकर्षण बल का अनुभव करता है और जब तक उसका वेग असाधारणतया अत्यधिक न हो, नाभिक को संस्पर्श नहीं कर सकता। परन्तु न्यूट्रन के साथ यह बात नहीं है। यह आसानी से नाभिक के समीप ही नहीं, वरन् उसके अन्दर तक घुस सकता है और उसे विखण्डित कर सकता है।

3.14. **कृत्रिम रेडियो धर्मिता (Artificial Radio-activity)**—यूरेनियम, थोरियम और ऐक्टीनियम आदि रेडियो-धर्मी पदार्थ तो अपने आप ही α, β, कण या γ-किरणें निकालते रहते हैं। परन्तु जूलियट क्यू ी ने देखा कि अलूमीनियम जैसे हल्के तत्व भी α-कणों की बौछार के बाद रेडियो धर्मी बन जाते हैं। इस

3.11. **रेडियो धर्मी परमाणु का विघटन (Disintegration of Radio-active Atoms)**—रथरफोर्ड और सौदी (Soddy) ने रेडियो धर्मी परमाणुओं के विघटन (disintegration) के विषय में दो नियम दिये—

(i) प्रत्येक रेडियो धर्मी पदार्थ के परमाणु अविराम गति से लगातार नवीन रेडियो धर्मी परमाणुओं में परिवर्तित होते रहते हैं और साथ में α, β और γ किरणें भी निकालते हैं।

(ii) उनके विघटन की दर ताप, दबाव, रासायनिक संगठन आदि बाह्य कारणों से प्रभावित नहीं होती।

जितने समय में रेडियो धर्मी पदार्थ के आधे परमाणु विघटित हो जाते हैं वह उस पदार्थ का "अर्द्धजीवन काल" (Half-life Period) कहलाता है।

रथरफोर्ड और सैदी ने रेडियो-धर्मी विघटन के विषय में एक सिद्धान्त का प्रतिपादन किया। उनके अनुसार किसी भी क्षण विघटित होनेवाले परमाणुओं की संख्या कुल विद्यमान परमाणुओं की संख्या के समानुपाती होती है। यदि किसी समय कुल 100 परमाणु हों, और उनका 1/4 भाग विघटित हो रहा हो, तो पहले 25 परमाणु विघटित होंगे। शेष ·75 परमाणुओं का चौथाई भाग विघटित होने से $75 \times 3/4 = 56{\cdot}25$ परमाणु बचेंगे। फिर 56·25 के चौथाई परमाणु विघटित होकर 56·25 के तीन चौथाई परमाणु अविघटित रहेंगे। यह क्रम बराबर जारी रहेगा।

3.12. **रेडियो-धर्मी श्रेणी (Radio-active Series)**—(i) α-कण का आवेश +2 इकाई और संहति 4 इकाई है। अतः जब भी कोई परमाणु एक α-कण निकालेगा तो उसकी संहति संख्या (mass number) 4 कम हो जायेगा और परमाणु संख्या (atomic number) 2 कम हो जायेगा। अतः स्पष्ट है कि α–विघटन के बाद नवजात परमाणु मूल परमाणु से आवर्त्त-सारिणी (Periodic Table) में दो स्थान नीचे खिसक आयेगा।

(ii) β–कण का आवेश –·1 और संहति नगण्य है। अतः β–विघटन (decay) के पश्चात् परमाणु की संहति संख्या तो वही रहेगी, परन्तु परमाणु संख्या 1 बढ़ जायेगी। क्योंकि नाभिक से एक ऋणावेश के निकल जाने से 1 धन आवेश की वृद्धि हो जायेगी अतः नवजात परमाणु आवर्त्त सारिणी में 1 स्थान ऊपर चला जायेगा।

यूरेनियम (U), थोरियम (Th) और ऐक्टीनियम (Ac) से प्रारम्भ हो कर तीन अलग-अलग रेडियो धर्मी शृंखलायें सीसे (lead) पर आकर समाप्त होती हैं। इन तीनों शृंखलाओं से सीसे के तीन परमाणु उत्पन्न होते हैं जिनकी परमाणु संख्या 82 होती है और समान रासायनिक गुण प्रदर्शित करते हैं। परन्तु इनकी संहति संख्या क्रमशः 206, 208 और 207 हैं। समान परमाणु संख्या परन्तु विभिन्न संहति संख्या

वाले एक ही परमाणु के रूपों को "समस्थानिक" (Isotope) कहते हैं। इस प्रकार सीसा के तीन समस्थानिक हैं (206, 208, 207)।

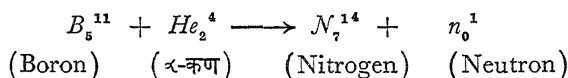
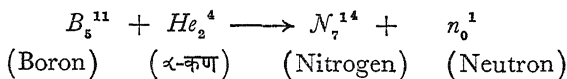
3.13. **न्यूट्रन (Neutron)**—सन् 1932 में चाडविक (Chadwick) ने बैरिलियम (Be_9) की चद्दर पर तीव्र-गामी ∝-कणों की बौछार डाली तो देखा कि उससे निकलनेवाली किरणें पदार्थ में बहुत गहराई तक घुस जाती हैं। 1·5 सें० मी० मोटी सीसा (lead) की चादर पार करने से उनकी तीव्रता केवल 50% घट पाती है। चुम्बकीय क्षेत्र या विद्युतीय क्षेत्र का इनके मार्ग पर कोई प्रभाव नहीं पड़ता। अतः इनका आवेश तो शून्य है। परन्तु अन्य परमाणुओं जैसे N, H, Be आदि के साथ सीधी टक्कर के बाद उनके आवेग (momentum) नाप कर गणना करने से ज्ञात होता है कि उनकी संहति 1·0070 है जब कि प्रोटन की संहति 1·0076 है। अर्थात् न्यूट्रन का आवेश शून्य और संहति लगभग 1 है।

न्यूट्रन की खोज के बाद परमाणु के नाभिक की रचना के विषय में वैज्ञानिकों की धारणा बिल्कुल बदल गई। इसके पूर्व यह विचार था कि नाभिक में प्रोटन और इलैक्ट्रन होते हैं। परन्तु बाद में देखा गया कि इलैक्ट्रन का आकार नाभिक से बड़ा है। अतः यह नाभिक में नहीं रह सकता।

आधुनिक विचारों के अनुसार नाभिक प्रोटन और न्यूट्रन से मिल कर बनी है। यदि किसी परमाणु की संहति संख्या A और परमाणु संख्या Z है, तो उसके नाभिक में प्रोटन की संख्या Z होगी और न्यूट्रन की संख्या $(A-Z)$। नाभिक से बाहर परिक्रमा करनेवाले इलैक्ट्रनों की संख्या भी Z होगी।

बोरोन और ∝-कण की टक्कर से निम्न नाभिक क्रिया के अनुसार न्यूट्रन उत्पन्न होता है—

$$B_5^{11} + He_2^4 \longrightarrow N_7^{14} + n_0^1$$

(Boron) (∝-कण) (Nitrogen) (Neutron)

क्योंकि न्यूट्रन पर कोई आवेश नहीं होता अतः यह किसी भी परमाणु के नाभिक के निकट बड़ी आसानी से पहुँच जाता है। ∝-कण क्योंकि धनावेशित है अतः नाभिक के समीप विकर्षण बल का अनुभव करता है और जब तक उसका वेग असाधारणतया अत्यधिक न हो, नाभिक को संस्पर्श नहीं कर सकता। परन्तु न्यूट्रन के साथ यह बात नहीं है। यह आसानी से नाभिक के समीप ही नहीं, वरन् उसके अन्दर तक घुस सकता है और उसे विखण्डित कर सकता है।

3.14. **कृत्रिम रेडियो धर्मिता (Artificial Radio-activity)**—यूरेनियम, थोरियम और ऐक्टीनियम आदि रेडियो-धर्मी पदार्थ तो अपने आप ही ∝, β, कण या γ-किरणें निकालते रहते हैं। परन्तु जूलियट क्यू ी ने देखा कि अलूमीनियम जैसे हल्के तत्व भी ∝-कणों की बौछार के बाद रेडियो धर्मी बन जाते हैं। इस

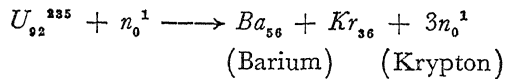
घटना को कृत्रिम रेडियो धर्मिता (Artificial Radio-acticvity) कहते हैं। परन्तु इस प्रकार उत्पन्न हुए कृत्रिम रेडियो धर्मी परमाणुओं का जीवन काल (life period) बहुत कम होता है। कुछ सेकिंड या घंटों के बाद इनकी क्रियाशीलता नगण्य हो जाती है।

रेडियो धर्मिता के शांतिमय उपयोगों के प्रसंग में बहुत से ऐसे रेडियो धर्मी समस्थानिक (Isotopes) तैयार किये गये हैं। उनमें से रेडियो कोबाल्ट और रेडियो आयोडीन उल्लेखनीय हैं। अब तक कैंसर नामक फोड़ा असाध्य समझा जाता था, परन्तु प्रयोगों द्वारा ज्ञात हुआ है कि रेडियो धर्मी कोबाल्ट से निकलनेवाली रेडियो धर्मी किरणें कैंसर पर आक्रमण करके प्रभावित भाग को रोग-मुक्त कर देती हैं। इससे रोगी को कोई कष्ट नहीं होता। यदि थायोराइड ग्रन्थि (Thyroid gland) में कैंसर हो तो रेडियो आयोडीन खिला देने से आयोडीन वांछित स्थान पर पहुँच कर अपनी रेडियो धर्मी किरणों से कैंसर को समाप्त कर देती हैं।

3.15. **परमाणु बम (Atomic Bomb) का सिद्धान्त**—साधारण यूरेनियम के दो समस्थानिक (Isotopes) पाये जाते हैं। दोनों की परमाणु संख्या तो 92 है, परन्तु उनमें से एक की संहति संख्या 238 और दूसरे की 235 है। U^{238} तीव्रगामी न्यूट्रन बड़ी सुगमता से पकड़ लेता है, परन्तु U^{235} इसके विपरीत मन्दगामी न्यूट्रन अपेक्षाकृत अधिक आसानी से पकड़ लेता है।

U^{235} की एक आश्चर्यजनक विशेषता है कि न्यूट्रन की टक्कर के बाद 56 और 36 परमाणु संख्या वाले दो भागों में विभाजित हो जाता है। साथ ही 3 न्यूट्रन निकलते हैं और अत्यधिक ऊर्जा मुक्त होती है।

$$U_{92}^{235} + n_0^{1} \longrightarrow Ba_{56} + Kr_{36} + 3n_0^{1}$$

(Barium) (Krypton)

विघटन के बाद उत्पन्न हुई बैरियम की उपस्थिति रासायनिक ढंग से ज्ञात की जा सकती है।

अब बैरियम + क्रिप्टन +3 न्यूट्रन की संहति U^{235} की संहति से कुछ कम है। आइन्स्टाइन के सापेक्षिक सिद्धान्त के अनुसार पदार्थ की संहति और ऊर्जा परस्पर समतुल्य हैं। m ग्राम संहति mc^2 अर्ग ऊर्जा के समतुल्य है। यहाँ $C = 3 \times 10^{10}$ सें० मी०/से० प्रकाश का निर्वात में वेग है। 1 ग्राम संहति यदि पूर्णतया ऊर्जा में परिणत हो जाय, तो 9×10^{20} अर्ग ऊर्जा उत्पन्न होगी। अतः इस नाभिक विखण्डन (nuclear fission) की प्रक्रिया में लुप्त हुई संहति ही ऊर्जा के रूप में प्रकट होती है। यह गणना की गई है कि 1 पौंड U^{235} से इतनी ऊर्जा उत्पन्न होती है जितनी 10,000 टन बन्दूक की बारूद से उत्पन्न होती है।

स्पष्ट है कि इस क्रिया में 1 न्यूट्रन से 3 न्यूट्रन उत्पन्न होते हैं। यदि ये नवजात अतिरिक्त न्यूट्रन भी अन्य U^{235} परमाणुओं का विघटन करने में प्रयुक्त हो सकें तो

यह क्रिया उस समय तक जारी रहेगी जब तक कि सब का सब U^{235} समाप्त नहीं हो जाता है। नाभिक विखण्डन की गति उत्तरोत्तर बढ़ती ही जायेगी। शीघ्र ही बड़ा ऊँचा ताप ($10^6 {}^\circ C$) उत्पन्न होगा।

इसी सिद्धान्त पर परमाणु बम बनाया गया है। एक परमाणु बम के मुख्य अवयव तीन हैं—

(i) **न्यूट्रन स्रोत**—जैसे रेडियम जिससे उत्पन्न हुए न्यूट्रन वांछित समय पर क्रिया प्रारम्भ कर सकें।

(ii) U^{235} या अन्य विखण्डनशील (fissionable) पदार्थ।

(iii) तीव्रगामी न्यूट्रनों को मन्द (Slow) करने के लिये प्रबन्ध। इसके लिये कैडमियम या मोम (wax) प्रयुक्त हो सकता है।

नाभिक विखण्डन में उत्पन्न हुई इस अपार ऊर्जा के शान्तिमय उपयोगों की ओर प्रयोग हो रहे हैं। इस ऊर्जा के उत्पादन की दर को नियंत्रित करके पानी की वाष्प बनाई जाती है, जिससे टरबाइन (Turbine) चला कर विद्युत् शक्ति उत्पन्न की जाती है। अभी हाल में रूस ने दो स्पुटनिक (Sputniks) छोड़े हैं। सम्भवत: इनको इतना ऊँचा आवेग प्रदान करने के लिये नाभिक ऊर्जा (nuclear energy) का ही उपयोग किया गया है।

सारांश

कुछ पदार्थ स्वत: विघटित हो कर तीन प्रकार की किरणों निकालते रहते हैं। इनके विघटित होने की गति को किसी साधन द्वारा घटाया-बढ़ाया नहीं जा सकता। इन (रेडियो धर्मी) पदार्थों से निम्न किरणें निकलती हैं, (i) अल्फ़ा किरणें—ये हीलियम के वे परमाणु हैं, जिनमें से दो इलैक्ट्रन निकल चुके हैं, (ii) बीटा किरणें—ये विभिन्न गतियों के इलैक्ट्रन समूह होते हैं और (iii) γ-किरणे।

इस प्रकार का विघटन भारी परमाणु-भार वाले पदार्थों में (यूरेनियम, थोरियम और ऐक्टीनियम) ही होता है। यदि विशेष रूप से अवमन्दित न्यूट्रान, परमाणु की नाभि में भेजे जायें, तो वे नाभियों को विघटित करके एक श्रृंखला प्रतिक्रिया (chain reaction) उत्पन्न कर सकते हैं। परमाणु की नाभि में थोड़ा-सा भी विघटन होने से बहुत ऊर्जा उन्मुक्त होती है। इसी सिद्धान्त पर परमाणु-बम की रचना हुई है।

अभ्यास के लिये प्रश्न

1. रेडियो धर्मिता (Radio acticvity) से आप क्या समझते हैं? कृत्रिम रेडियो-धर्मिता पर प्रकाश डालिये। प्राकृतिक रेडियो धर्मिता के विषय में रथरफोर्ड और सौडी के मत का वर्णन कीजिए।
2. रेडियो धर्मी किरणें कौन-कौन हैं। उनके गुण बताइये।
3. आप कैसे सिद्ध करेंगे कि α-कण हीलियम परमाणु का नाभिक है?

4. नाभिक विखण्डन (nuclear fission) से आप क्या समझते हैं? परमाणु बम के सिद्धान्त पर प्रकाश डालिये।
5. अल्फा रश्मियों (α-rays) की प्रकृति पर प्रकाश डालिए और उनके गुणों का विवरण दीजिए।
6. गाइगर मुलर काउण्टर की रचना और उपयोग का वर्णन कीजिए।
7. बीटा-रश्मियाँ क्या हैं? क्या वेग के अनुसार उनकी संहति में अन्तर होता है?
8. रेडियो धर्मिता के शान्तिमय उपयोगों पर प्रकाश डालिए।
9. गामा-किरणों के गुणों पर प्रकाश डालिए। रेडियो धर्मी श्रेणी से क्या अभिप्राय है?